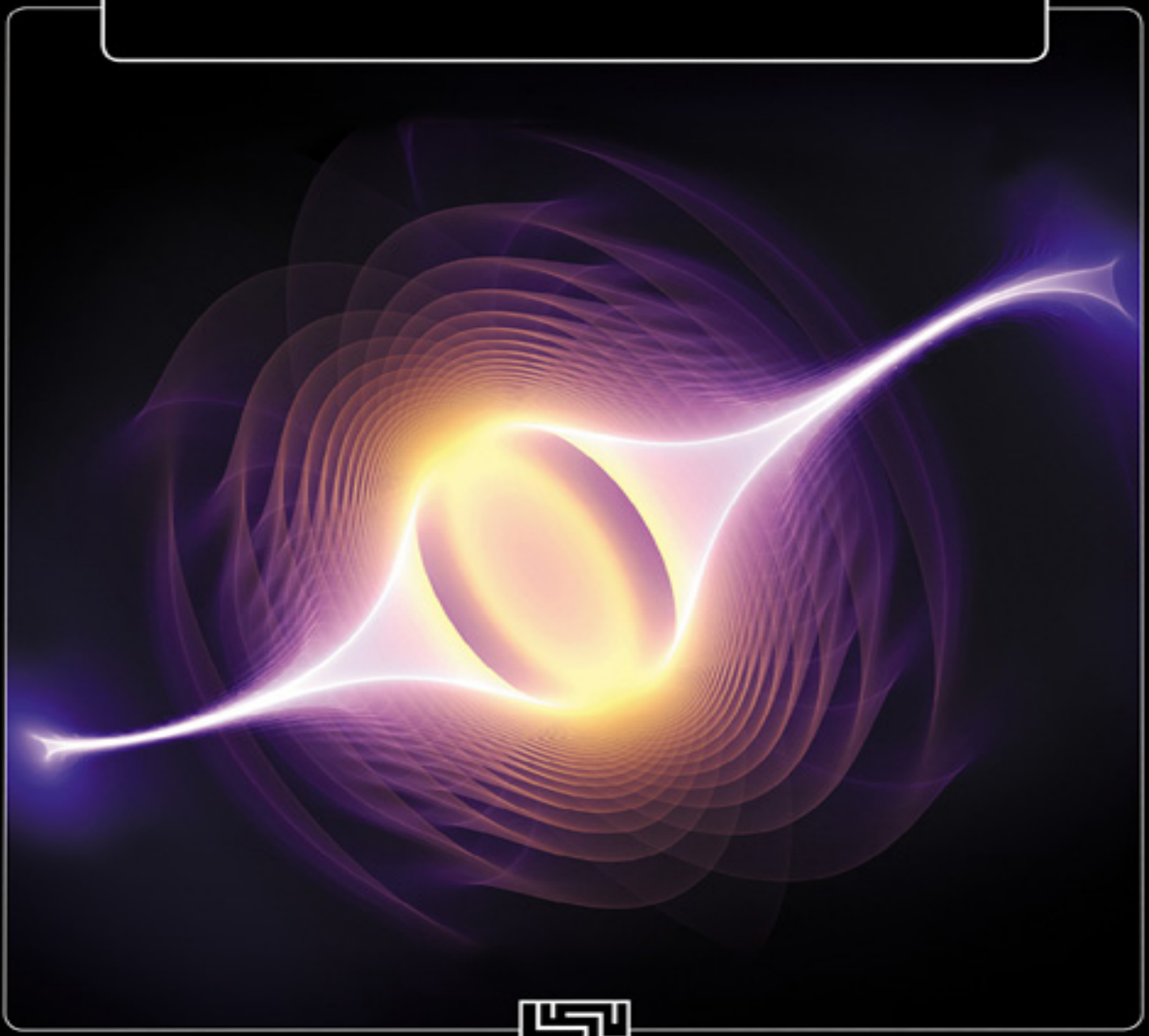
Frank Wilczek

LAUREAT NAGRODY NOBLA W DZIEDZINIE FIZYKI

# LEKKOŚĆ BYTU

## MASA, ETER I UNIFIKACJA SIŁ



NA ŚCIEŻKACH NAUKI

Prószyński i S-ka

Frank Wilczek

# LEKKOŚĆ BYTU

## Masa, eter i unifikacja sił

Przełożyli
Bogumił Bieniok
i Ewa L. Łokas

Prószyński i S-ka

Tytuł oryginału
THE LIGHTNESS OF BEING. MASS, ETHER, AND THE UNIFICATION OF FORCES

Copyright © 2008 by Frank Wilczek
All rights reserved

Projekt okładki
Irina Pozniak

Zdjęcie na okładce
Istockphoto.com

Redaktor serii
Adrian Markowski

Redakcja
Anna Kaniewska

ISBN 978–83–7961–974–0

Warszawa 2011

Wydawca
Prószyński Media Sp. z o.o.
02–697 Warszawa, ul. Rzymowskiego 28
www.proszynski.pl

*Książkę dedykuję pamięci*
*Sama Treimana i Sidneya Colemana*
*– byli moimi przewodnikami w świecie nauki*
*i przyjaciółmi w życiu osobistym.*

# O tytule

*Nieznośna lekkość bytu* – tak brzmi tytuł znanej powieści Milana Kundery, jednej z moich ulubionych książek. Traktuje ona o wielu sprawach, ale najważniejsza jest w niej chyba próba doszukania się prawidłowości i znaczenia w pozornie przypadkowym, dziwnym i czasami okrutnym świecie, w którym żyjemy. Oczywiście sposób, w jaki Kundera zmaga się z tymi problemami, wykorzystując narrację i sztukę, jest odmienny od tego, jaki ja przyjąłem w niniejszej książce, w której posługuję się nauką i (lekką) filozofią. Przynajmniej w moim przypadku zrozumienie ukrytej głęboko struktury rzeczywistości sprawiło, że Byt stał się nie tylko znośny, ale wręcz magiczny – i czarowny. Stąd ~~*Nieznośna*~~ *Lekkość bytu*.

Tytuł ten ma również nieco żartobliwy wydźwięk. Głównym wątkiem niniejszej książki jest fakt, że udało nam się pokonać odwieczną sprzeczność między pochodzącym z niebios światłem a ziemską materią. We współczesnej fizyce istnieje tylko jedna forma bytu i bardziej przypomina ona tradycyjną ideę światła niż klasyczną ideę materii. Stąd ***Lekkość*** *bytu*.

# Wskazówki dla czytelników

Podstawowy układ niniejszej książki jest najprostszy z możliwych: została ona skonstruowana tak, aby można ją było czytać rozdział za rozdziałem, od początku do końca. Dodatkowo jednak zamieściłem w niej również:

- Rozbudowany słownik, żebyście się nie potykali o nieznane określenia ani nie musieli zaglądać pięćdziesiąt stron wstecz do miejsca, w których były one wcześniej objaśnione. W słowniku dodałem nawet kilka żartów.
- Uwagi końcowe, w których rozwijam pewne szczegółowe kwestie, podążam śladem niektórych istotnych wątków oraz zamieszczam odwołania do innych dzieł i źródeł.
- Trzy dodatki. Pierwsze dwa pogłębiają dyskusje zapoczątkowane w rozdziałach, odpowiednio, trzecim i ósmym; w trzecim dodatku zamieściłem relację z pierwszej ręki z dokonania odkrycia, o którym mowa w rozdziale dwudziestym.
- Oprócz tego przygotowałem stronę internetową w języku angielskim – frankwilczek.com – na której można znaleźć dodatkowe ilustracje, odsyłacze i najnowsze informacje związane z niniejszą książką.

Czytając książkę, możecie po ukończeniu odpowiednich rozdziałów przejść do lektury związanych z nimi dodatków albo zacząć od razu kolejny rozdział, który również w takim przypadku powinien być w pełni zrozumiały. Po napisaniu rozdziału ósmego zastanawiałem się, czy nie powinienem usunąć części zawartego w nim materiału, ale ostatecznie nie mogłem się na to zdobyć. Dlatego jest w nim *wiele* hałasu o Nic.

# Część I

# Pochodzenie masy

Materia nie jest tym, czym się wydaje. Jej najbardziej oczywistą własność – nazywaną różnie: oporem wobec ruchu, bezwładnością lub masą – można zrozumieć dużo lepiej, posługując się zupełnie innymi pojęciami. Masa zwykłej materii jest przejawem energii bardziej podstawowych składników, które same masy nie posiadają. Również przestrzeń nie jest tym, czym się wydaje. W przestrzeni, która naszym oczom jawi się jako zupełnie pusta, umysły pozwalają nam odkryć złożone środowisko kipiące wprost od żywiołowej aktywności.

# Rozdział 1

# Istota rzeczy

*Wszechświat nie jest taki jak kiedyś ani taki, jaki się wydaje.*

O co w tym wszystkim chodzi? Ludzie rozmyślający nad otaczającym ich rozległym światem, różnorodnymi i często zadziwiającymi doświadczeniami, jakie przynosi życie, a także nad perspektywą śmierci, często zadają sobie to właśnie pytanie. Poszukujemy odpowiedzi w wielu miejscach: w starożytnych pismach i zachowanych do naszych czasów tradycjach, miłości i mądrości innych ludzi, utworach muzycznych i sztukach pięknych. Każde z tych źródeł ma nam coś do zaoferowania.

Gdy podejdziemy jednak do tego problemu logicznie, pierwszym krokiem w poszukiwaniu odpowiedzi powinno być zrozumienie, czym jest owo „coś". Nasz świat sam może nam powiedzieć kilka ważnych i zadziwiających rzeczy. Temu właśnie jest poświęcona niniejsza książka. Chciałbym poszerzyć wasze zrozumienie tego, czym jest owo „coś", w którym wszyscy się znajdujemy.

## Zmysły a modele świata

Zauważmy na początku, że nasze modele świata budujemy z dziwnych surowców: posługujemy się narzędziami do przetwarzania sygnałów „zaprojektowanymi" przez ewolucję specjalnie w celu filtrowania informacji pochodzących

z Wszechświata, który aż buzuje od ich nadmiaru, i tworzenia z tego zaledwie kilku strumieni danych wejściowych.

Strumienie danych? Ich bardziej swojskie nazwy to wzrok, słuch, węch i tak dalej. Używając języka naukowego, powiedzielibyśmy, że wzrok służy do próbkowania promieniowania elektromagnetycznego wpadającego przez niewielkie otworki w oczach i wybierania jedynie wąskiego pasma barw ze znacznie szerszego widma. Słuch pozwala nam natomiast monitorować ciśnienie powietrza w pobliżu błony bębenkowej, węch zaś umożliwia przeprowadzenie swoistej analizy chemicznej powietrza odbijającego się od błony śluzowej nosa. Inne zmysły dają ogólną informację o przyspieszeniu naszego ciała (zmysł kinestetyczny), temperaturze i ciśnieniu wokół jego powierzchni (dotyk), pozwalają przeprowadzić kilka dosyć prostych pomiarów składu chemicznego substancji znajdujących się na języku (smak) i podają jeszcze kilka mniej istotnych danych.

Dzięki tym zmysłom nasi przodkowie – tak jak my – mogli skonstruować bogaty, dynamiczny model świata, pozwalający szybko reagować na docierające do nich bodźce. Najważniejszymi składnikami tego modelu są obiekty mniej więcej stałe (takie jak inni ludzie, zwierzęta, rośliny, skały, Słońce, gwiazdy, obłoki…); niektóre z nich się przemieszczają, są niebezpieczne, nadają się do zjedzenia, a inne – wybrana i szczególnie interesująca niewielka ich grupa – są pociągającymi partnerami płci przeciwnej.

Dzięki zastosowaniu przyrządów wzmacniających zmysły udało nam się odkryć jeszcze bogatszy świat. Gdy w latach siedemdziesiątych XVII wieku Antonie van Leeuwenhoek spojrzał na świat przez pierwszy porządny mikroskop, ujrzał zupełnie niespodziewanie ukryte dotychczas poziomy istot żywych. Mówiąc krótko, odkrył bakterie, plemniki i wiązki włókien mięśniowych. Dzisiaj wiemy, że bakterie wywołują wiele chorób (ale także przynoszą nam liczne korzyści), za dziedziczenie cech odpowiedzialny jest maleńki plemnik (mówiąc dokładniej, w połowie), a zdolność do poruszania się zawdzięczamy właśnie owym włóknom mięśniowym. Podobnie gdy w drugim dziesięcioleciu XVII wieku Galileusz po raz pierwszy skierował teleskop w niebo, zobaczył

bogactwo nowych obiektów: odkrył plamy na Słońcu, góry na Księżycu, księżyce Jowisza i niezliczone gwiazdy Drogi Mlecznej.

Najdoskonalszym jednak narzędziem wzmacniającym działanie zmysłów jest myślący rozum. Dzięki niemu możemy uświadomić sobie, że świat jest bogatszy, niż można by sądzić na podstawie tego, co widzimy, a pod wieloma względami jest wręcz zupełnie inny. Za pomocą samej analizy bodźców odbieranych w danym momencie przez zmysły nie da się odkryć wielu kluczowych faktów związanych ze światem. Następstwo pór roku powiązane z rocznym cyklem wschodów i zachodów Słońca, obracanie się gwiazd na nocnym niebie czy bardziej zawiłe, ale wciąż możliwe do przewidzenia ruchy Księżyca i planet oraz ich związek z zaćmieniami – tych wzorców nie dostrzeżemy, jeśli będziemy polegać jedynie na wzroku, słuchu czy powonieniu. Myślący umysł może je jednak odkryć. A gdy już dostrzeże te prawidłowości, umysł taki szybko zorientuje się, że są one *dużo bardziej* regularne niż praktyczne zasady, którymi kierujemy się, tworząc plany i snując marzenia. Głębsze, ukryte regularności mają związek z liczbami i geometrią: mówiąc krótko, z matematyczną dokładnością.

Inne ukryte prawidłowości stały się widoczne dzięki rozwojowi techniki oraz, co niezwykłe, sztuki. Budowa strunowych instrumentów muzycznych jest tego pięknym i niezwykle ważnym z historycznego punktu widzenia przykładem. Około roku 600 p.n.e. Pitagoras zauważył, że dźwięki liry brzmią najbardziej zgodnie wtedy, gdy stosunek długości strun jest prostym ułamkiem liczb całkowitych. Zainspirowani tego typu wskazówkami zwolennicy Pitagorasa dokonali niezwykłego, intuicyjnego kroku w przód. Przewidzieli możliwość istnienia innych typów modeli świata, w mniejszym stopniu opierających się na przypadkowych informacjach odbieranych przez nasze zmysły, a bardziej dostrojonych do skrytych harmonii Natury i w efekcie lepiej oddających rzeczywistość. Tak właśnie należy odczytywać motto bractwa pitagorejczyków: „Wszystko jest liczbą”.

Rewolucja naukowa XVII wieku zaczęła potwierdzać owe marzenia starożytnych Greków. Wynikiem tego przewrotu były zasady dynamiki i prawo grawitacji Izaaka Newtona. Dzięki tym prawom

można było przeprowadzić dokładne obliczenia ruchu planet i komet, stały się one również potężnymi narzędziami do opisu ruchu materii w ogóle.

A przecież prawa Newtona działają w modelu świata, który bardzo odbiega od naszych codziennych wyobrażeń. Ponieważ przestrzeń newtonowska jest nieskończona i jednorodna, Ziemia i jej powierzchnia nie są jakimiś szczególnie wyróżnionymi miejscami. Kierunki „góra", „dół" i „na boki" są w gruncie rzeczy do siebie podobne. Nawet stan spoczynku nie jest uprzywilejowany względem ruchu jednostajnego prostoliniowego. Nic z tego nie pasuje do naszych codziennych doświadczeń. Nie dawało to spokoju współczesnym Newtona, a nawet jemu samemu. (Nie był zadowolony ze względności ruchu, mimo że logicznie wynika ona z jego równań, aby więc jej uniknąć, zaproponował istnienie „absolutnej" przestrzeni, względem której można zdefiniować prawdziwy stan spoczynku i ruch).

Kolejny wielki postęp dokonał się w XIX wieku, gdy James Clerk Maxwell przedstawił równania elektryczności i magnetyzmu. Te nowe równania objęły znacznie szerszy zakres zjawisk, między innymi zarówno znane wcześniej, jak i przewidywane dopiero rodzaje światła (które obecnie nazywamy na przykład promieniowaniem ultrafioletowym i falami radiowymi), i umieściły je w precyzyjnym matematycznym modelu świata. Jednak podobnie jak wcześniej wymagało to odpowiedniego dostosowania znacznych obszarów naszego postrzegania rzeczywistości. Tam gdzie Newton opisywał ruch cząstek pod wpływem grawitacji, równania Maxwella zapełniały przestrzeń grą „pól" i „eterów". Według Maxwella to, co nasze zmysły odbierają jako pustą przestrzeń, jest w rzeczywistości miejscem występowania niewidzialnych pól elektrycznych i magnetycznych, które wywierają siłę na obserwowaną przez nas materię. Chociaż na początku były one jedynie tworami matematycznymi, pola szybko wyszły z równań i zaczęły żyć własnym życiem. Zmienne pola elektryczne powodują powstanie pól magnetycznych, a zmienne pola magnetyczne – pojawienie się pól elektrycznych. Pola te mogą zatem się wzajemnie pobudzać, dając początek samonapędzającym się

zaburzeniom, które rozchodzą się z prędkością światła. Od czasów Maxwella rozumiemy, że światło *jest* właśnie takim zaburzeniem.

Odkrycia Newtona, Maxwella i wielu innych genialnych ludzi znacznie poszerzyły ludzką wyobraźnię. Jednak dopiero w fizyce wieku XX i XXI marzenia pitagorejczyków zaczęły naprawdę przynosić owoce. W miarę jak nasz opis podstawowych procesów staje się coraz pełniejszy, zaczynamy coraz więcej dostrzegać, a także patrzeć w sposób inny niż dotąd. Skryta głęboko struktura świata różni się znacznie od tego, co widać na jego powierzchni. Zmysły, z którymi się rodzimy, nie są dostosowane do postrzegania najpełniejszych i najbardziej dokładnych znanych nam modeli świata. Zachęcam więc do poszerzenia waszego obrazu rzeczywistości.

## Moc, sens i metoda

Gdy byłem nastolatkiem, pociągała mnie idea, że za zwyczajnym wyglądem rzeczy kryją się wielkie moce i tajemne znaczenia[1]. Fascynowały mnie sztuczki magiczne i chciałem zostać iluzjonistą. Jednak już pierwszy zestaw do wykonywania sztuczek przyniósł całkowite rozczarowanie. Przekonałem się, że tajemnicą magii nie była jakaś prawdziwa moc, ale jedynie sprytne oszustwo.

Później urzekła mnie religia: w szczególności wiara Kościoła rzymskokatolickiego, w której się wychowałem. Dowiedziałem się, że za zwyczajnym wyglądem rzeczy kryją się tajemne znaczenia i wielkie moce, na które można wpływać modlitwą i rytuałami. Jednak w miarę jak coraz lepiej poznawałem naukę, okazywało się, że niektóre pojęcia i wyjaśnienia podane w starożytnych świętych tekstach wydają się całkowicie błędne; a gdy dowiedziałem się więcej o historii i historiografii (piśmiennictwie historycznym), prawdziwość niektórych opowieści zawartych w tych tekstach stała się bardzo wątpliwa.

Najbardziej jednak rozczarowujące było nie to, że święte pisma zawierają błędy, lecz to, że bledną wobec innych źródeł wiedzy. W porównaniu z tym, czego dowiadywałem się, poznając naukę,

miały one do zaoferowania niewiele prawdziwie zadziwiających i głębokich przemyśleń. Jakaż wizja może się równać z pojęciami nieskończonej przestrzeni, olbrzymich połaci czasu, odległych gwiazd wielkich jak nasze Słońce, a nawet jeszcze większych? Ukrytych sił i nowych, niewidzialnych rodzajów „światła”? Czy też z potężną energią, którą ludzie mogliby nauczyć się wyzwalać i wykorzystywać dzięki zrozumieniu procesów *naturalnych*? Doszedłem do wniosku, że jeżeli Bóg istnieje, dużo większe wrażenie wywiera Jego (albo Jej, a może Ich) dzieło widoczne w świecie niż świadectwo przekazane w starych księgach – oraz że moc wiary i modlitwy jest ulotna i zawodna w porównaniu ze zdarzającymi się na co dzień cudami medycyny i techniki.

– Zaraz, zaraz – już słyszę sprzeciw ludzi wierzących, w tradycyjnym znaczeniu tego słowa – przecież badania naukowe świata przyrody nie pozwalają nam odkryć jego *sensu*.

Odpowiadam na to: dajcie im szansę. Nauka odkrywa niezwykle zadziwiające fakty dotyczące tego, czym jest świat. Czy sądzicie, że możliwe jest zrozumienie jego znaczenia bez wcześniejszego dowiedzenia się, czym on jest?

W czasach Galileusza profesorowie filozofii i teologii – dziedziny te były wówczas nierozłączne – pisali długie rozprawy na temat natury rzeczywistości, struktury Wszechświata i sposobu funkcjonowania świata, wykorzystując wyrafinowane metafizyczne wywody. W tym samym czasie Galileusz dokonywał pomiarów prędkości toczenia się kuli po równi pochyłej. Cóż za prozaiczne zajęcie! Jednak uczone wywody, choć nie brakowało im rozmachu, były niejasne. Badania Galileusza okazały się za to jasne i precyzyjne. Stara metafizyka nigdy się nie rozwinęła, natomiast dzieło Galileusza wydało obfite i po pewnym czasie spektakularne owoce. Galileuszowi także zależało na znalezieniu odpowiedzi na wielkie pytania, ale uświadomił sobie, że zdobycie wiarygodnych wyjaśnień wymaga cierpliwości i pokory wobec faktów.

Płynąca z tej opowieści nauka zachowuje swoją ważność również dzisiaj. Najlepszym sposobem na uporanie się z wielkimi fundamentalnymi pytaniami będzie zapewne prowadzenie dialogu z Naturą. Musimy postawić precyzyjne pytania pomocnicze, dzięki

którym Natura będzie miała okazję do udzielenia czytelnych dla nas odpowiedzi, a w szczególności podania wyjaśnień, które okażą się dla nas nie lada zaskoczeniem.

Podejście takie nie jest dla nas naturalne. Życie, do którego przygotowała nas ewolucja, wymaga, aby ważne decyzje były podejmowane szybko, z wykorzystaniem dostępnej w danym momencie informacji. Ludzie musieli ugodzić włócznią swoją zdobycz, zanim *sami* stali się zdobyczą. Nie mieli czasu, by przystanąć i zastanowić się nad prawami ruchu, aerodynamiką włóczni i trajektorią jej lotu. Poza tym wielkie niespodzianki bez wątpienia *nie były* mile widziane. Ewolucja przystosowała nas do wyciągania wniosków i stosowania praktycznych zasad, a nie do poszukiwania pierwotnych przyczyn i dokonywania subtelnych rozróżnień. W jeszcze mniejszym stopniu przygotowała nas do przeprowadzania długich ciągów obliczeń wiążących prawa podstawowe z dającymi się zaobserwować ich konsekwencjami. Komputery są w tym znacznie lepsze!

By odnieść pełną korzyść z dialogu z Naturą, musimy się zgodzić na używanie jej języka. Sposób myślenia, dzięki któremu udało nam się przetrwać i rozmnożyć na afrykańskiej sawannie 200 tysięcy lat p.n.e., już nie wystarcza. Zachęcam was do poszerzenia horyzontów myślowych.

## Znaczenie masy

W niniejszej książce zajmiemy się jednymi z najważniejszych pytań, jakie można sobie wyobrazić: pytaniami o ostateczną strukturę fizycznej rzeczywistości, naturę przestrzeni, zawartość Wszechświata i przyszłość badań naukowych. Biorąc jednak przykład z Galileusza, zajmę się tymi pytaniami dopiero wtedy, gdy wyłonią się z dialogu z Naturą dotyczącego jakiegoś konkretnego tematu.

Tematem, który stanie się dla nas furtką do znacznie ważniejszych pytań, jest *masa*. By dogłębnie ją zrozumieć, przyjrzymy się dokonaniom Newtona, Maxwella i Einsteina, poznamy wiele

najnowszych i najdziwniejszych idei fizycznych. Przekonamy się, że dzięki zrozumieniu pojęcia masy możemy zająć się podstawowymi kwestiami dotyczącymi unifikacji i grawitacji, które są obecnie na pierwszej linii frontu badań naukowych.

Dlaczego masa ma takie znaczenie? Pozwólcie, że opowiem wam pewną historię.

Było sobie raz coś, co zwano materią. Była ona solidna, ciężka i trwała. I było też coś jeszcze, coś zupełnie innego, co nazywano światłem. Ludzie odbierali je za pomocą osobnych strumieni danych; pierwszą z nich dotykali, drugie widzieli. Pojęcia materii i światła były – i nadal są – trafnymi porównaniami wykorzystywanymi do opisu innych przeciwstawnych aspektów rzeczywistości: ciała i ducha, bycia i stawania się, tego co ziemskie i tego co niebiańskie.

Gdy materia pojawiała się znikąd, traktowano to jako cud, taki sam jak wtedy, gdy Jezus nakarmił tłum siedmioma bochenkami chleba.

Naukową duszą materii, jej nieredukowalną istotą, była masa. Stanowiła ona źródło bezwładności – oporu materii przed wprawieniem jej w ruch. Była też niezmienna, zawsze „zachowywana". Można ją było przenieść z jednego ciała na drugie, ale nigdy nie mogła ani pojawić się, ani zniknąć. Dla Newtona masa *określała* ilość materii. W fizyce newtonowskiej masa jest ogniwem łączącym siłę z ruchem, jest też źródłem grawitacji. Dla Lavoisiera trwałość masy, spełniana z dużą precyzją zasada jej zachowania, stała się podstawą chemii i niezwykle owocną wskazówką, pomocną w dokonywaniu odkryć. Jeśli wydaje się, że masa znika, poszukaj jej gdzieś w nowej postaci – i *voilà*, mamy tlen!

Światło, jak ustalono, nie ma masy. Przemieszcza się od źródła do odbiornika z niewiarygodną prędkością, bez żadnego popychania. Można je bez trudu wytworzyć (wyemitować) i zniszczyć (zaabsorbować). Uważano również, że nie wywiera ono żadnego przyciągania grawitacyjnego. Nie było dla niego miejsca w układzie okresowym pierwiastków, który porządkował podstawowe składniki materii.

W ciągu wielu stuleci poprzedzających powstanie nowoczesnej nauki, a także przez pierwszych dwieście pięćdziesiąt lat jej rozwoju, podział rzeczywistości na materię i światło wydawał się kwestią

oczywistą. Materia ma masę, a światło nie; obowiązywała też zasada zachowania masy. Tak długo, jak utrzymywał się podział na byty posiadające masę i bezmasowe, nie było możliwe stworzenie zunifikowanego opisu świata fizycznego.

Na początku XX wieku pojawienie się teorii względności i (szczególnie) teorii kwantowej wstrząsnęło podstawami, na których opierała się fizyka klasyczna. Obowiązujące dotychczas teorie materii i światła legły w gruzach. Dzięki owemu procesowi twórczej destrukcji w drugiej połowie ubiegłego stulecia możliwe stało się stworzenie nowej i głębszej teorii materii/światła, która znosiła obwiązujący w przeszłości podział. W nowej teorii świat opiera się na wielorakości wypełniających przestrzeń eterów, które jako całość nazywam Siatką. Taki nowy model świata jest niezwykle dziwny, ale odnosi spektakularne sukcesy i okazuje się bardzo dokładny.

Z nowego modelu świata wynika całkowicie nowe zrozumienie pochodzenia masy zwykłej materii. Jak nowe? Będziemy jeszcze o tym mówić, ale teraz wspomnijmy jedynie, że masa wynika z teorii względności, kwantowej teorii pola i chromodynamiki – specjalnych praw rządzących zachowaniem się kwarków i gluonów. Zrozumienie pochodzenia masy *nie jest możliwe* bez gruntownego opanowania tych trzech pojęć. Jednak wszystkie one pojawiły się dopiero w XX wieku i w tym gronie jedynie (szczególna) teoria względności jest naprawdę dojrzałą dziedziną. Kwantowa teoria pola i chromodynamika wciąż są obszarami intensywnych badań naukowych, a wiele ważnych kwestii w tej dziedzinie pozostaje wciąż otwartych.

Fizycy, uskrzydleni sukcesem tych teorii i zdobytą dzięki ich rozwojowi wiedzą, wkraczają w XXI wiek z pomysłami na dokonanie kolejnych syntez. Obecnie gotowe są już do sprawdzenia idee sięgające daleko w kierunku uzyskania zunifikowanego opisu pozornie różnych sił natury i przedstawienia jednorodnego wyjaśnienia zdawałoby się różnych eterów, jakimi się posługujemy w fizyce. Mamy kilka subtelnych, napawających optymizmem wskazówek przemawiających za tym, że prace te idą w dobrym kierunku. Najbliższe kilka lat będzie dla tych pomysłów okresem

próby, ponieważ potężny akcelerator LHC (*Large Hadron Collider* – Wielki Zderzacz Hadronów) rozpoczyna właśnie swoją działalność.

*słuchaj: jest śliczny, piekielnie dobry wszechświat tuż obok; chodź z nami*[2].

– e. e. cummings

1 Wciąż wydaje mi się to atrakcyjne!

2 e. e. cummings, Litość to ruchliwe monstrum, przeł. Stanisław Barańczak; w: E. E. Cummings, Wybór wierszy, PIW, Warszawa 1985 (przyp. tłum.).

# Rozdział 2

# Zerowe prawo Newtona

*Czym jest materia? Fizyka newtonowska udzieliła dogłębnej odpowiedzi na to pytanie: materia jest tym, co posiada masę. Chociaż obecnie nie uważa się już masy za najistotniejszą własność materii, wciąż pozostaje ona ważnym aspektem rzeczywistości i musimy pozwolić, żeby zajęła należne jej miejsce.*

W *Matematycznych zasadach filozofii przyrody* (1686), monumentalnym dziele, które udoskonaliło mechanikę klasyczną[3] i zapoczątkowało epokę oświecenia, Izaak Newton sformułował trzy zasady dynamiki. Do dnia dzisiejszego kursy mechaniki klasycznej rozpoczynają się zwykle od przedstawienia jednej z wersji trzech zasad Newtona. Prawa te jednak nie są pełne. Jest jeszcze jedna zasada, bez której trzy prawa Newtona tracą większą część swej mocy. Owa ukryta zasada była tak podstawowa w podzielanym przez Newtona obrazie świata fizycznego, że uznał ją nie za prawo rządzące ruchem materii, ale za *definicję* tego, czym materia *jest*.

Prowadząc zajęcia z mechaniki klasycznej, zaczynam właśnie od przedstawienia tego ukrytego założenia, które nazywam zerowym prawem Newtona. Podkreślam też z całą mocą, że jest ono błędne! Czy definicja może być błędna? I czy to możliwe, by niepoprawna definicja była podstawą wielkiego dzieła naukowego?

Legendarny duński fizyk Niels Bohr rozróżniał dwa rodzaje prawdy. Prawdę zwykłą, której zaprzeczenie jest fałszem, i prawdę głęboką, której zaprzeczenie również jest prawdą głęboką.

Kontynuując rozważania w tym duchu, można by powiedzieć, że zwyczajny błąd to taki, który prowadzi w ślepy zaułek, natomiast błąd głęboki to taki, który prowadzi do postępu. Każdy może zrobić błąd zwyczajny, ale żeby popełnić błąd głęboki, trzeba już być geniuszem.

Zerowe prawo Newtona było *głębokim* błędem. Stało się ono kluczowym dogmatem *ancien régime'u* rządzącego fizyką, chemią i astronomią przez ponad dwa stulecia. Dopiero na początku XX wieku prace Plancka, Einsteina i innych zaczęły podważać stary porządek. Skruszony bombardowaniem nowymi odkryciami fizyki doświadczalnej w połowie ubiegłego stulecia *ancien régime* legł w gruzach.

Upadek ten otworzył drogę do stworzenia czegoś nowego. Zrodzony w ten sposób ład obejmuje całkowicie nowe zrozumienie tego, czym jest materia. Opiera się on na prawach różniących się od starych praw nie tylko w szczegółach, lecz także pod względem samej ich natury. To właśnie ta rewolucja w podstawowym rozumieniu świata i jej konsekwencje będą nas teraz najbardziej interesowały.

Aby jednak wykazać zasadność tej rewolucji, musimy najpierw wyraźnie wskazać niedociągnięcia dawnego porządku. Jego błędy są zaiste głębokie – w takim znaczeniu tego słowa, jakiego używał Bohr. *Ancien régime* fizyki newtonowskiej dawał nam względnie proste i łatwe do stosowania zasady, dzięki którym mogliśmy dosyć sprawnie sprawować władzę nad światem fizycznym. W praktyce wciąż jeszcze posługujemy się tymi zasadami do zarządzania spokojniejszymi, ustabilizowanymi obszarami rzeczywistości.

Zacznijmy więc od uważnego przyjrzenia się ukrytemu założeniu Newtona, jego zerowemu prawu – zwracając uwagę zarówno na jego olbrzymią siłę, jak i zgubną słabość. Prawo to stwierdza, że materia ani nie powstaje, ani nie znika. Cokolwiek by się wydarzyło – zderzenia, wybuchy, trwające milion lat ulewy i wichury – jeżeli zsumujemy całkowitą masę substancji na samym początku i na końcu, albo w dowolnej chwili w trakcie trwania tego procesu, zawsze uzyskamy taki sam wynik. Używając żargonu naukowego, powiemy, że masa jest zawsze zachowywana. Zerowe prawo

Newtona nazywa się zwykle dostojnym mianem *zasady zachowania masy*.

## Bóg a zerowe prawo Newtona

Aby zerowe prawo można było przekształcić w sensowne naukowe stwierdzenie opisujące świat fizyczny, musimy oczywiście określić, w jaki sposób różne masy mierzy się i porównuje. Zaraz się tym zajmiemy. Najpierw jednak pozwólcie, że wytłumaczę, dlaczego zerowe prawo nie jest jedynie kolejnym prawem fizycznym, lecz sposobem rozumienia świata – sposobem, który bardzo długo wydawał się wręcz doskonały.

Wiele mówi już sam fakt, że Newton zwykle używał określenia *ilość materii*, gdy mówił o wielkości, którą obecnie nazywamy masą. Użyte przez niego sformułowanie wskazuje, że nie może być materii bez masy. Masa jest definitywną miarą materii; mówi nam ona, ile mamy materii. Jeżeli nie ma masy, to nie ma materii. Dlatego zasada zachowania masy jest wyrazem – tak naprawdę stwierdzeniem równoważnym – trwałości materii. Dla Newtona zerowe prawo było nie tyle empiryczną obserwacją czy odkryciem doświadczalnym, ile nieodzowną prawdą; nie było ono prawem w ścisłym znaczeniu tego słowa, ale definicją. Albo raczej, o czym się zaraz przekonamy, wyrażało ono pewną religijną prawdę – wyobrażenie co do sposobu, w jaki Bóg stworzył świat. (Aby uniknąć wszelkich nieporozumień, pozwólcie, że podkreślę w tym miejscu, iż Newton był skrupulatnym fizykiem doświadczalnym i starannie sprawdzał, czy wnioski wypływające z jego definicji i założeń opisują Naturę tak dokładnie jak pomiary, które mógł wówczas przeprowadzić na ich potwierdzenie. Nie twierdzę, iż pozwalał, aby jego przekonania religijne brały górę nad rzeczywistością. Kwestia ta jest trochę bardziej subtelna: na przekonaniach tych zasadzała się jego intuicja na temat działania rzeczywistości. Motywacja Newtona, by zakładać, że coś takiego jak prawo zerowe może być prawdziwe, wynikała nie ze żmudnych eksperymentów, ale raczej z genialnej intuicji, której

źródłem były jego przekonania religijne na temat tego, jak powstał świat. Newton nie wątpił w istnienie Boga i swoją misję uczonego rozumiał jako zadanie odkrycia sposobu, w jaki Bóg rządzi światem fizycznym).

W późniejszym dziele *Opticks* (*Optyka*, 1704) Newton w sposób bardziej jednoznaczny wyraził swój pogląd na naturę materii:

> Wydaje mi się możliwe, że Bóg na początku utworzył materię w postaci litych, masywnych, twardych, nieprzenikalnych, ruchomych cząstek o takich rozmiarach, w takiej liczbie, o takich pozostałych własnościach i w takiej proporcji do przestrzeni, jaka najbardziej sprzyjała celom, dla których je stworzył; a ponieważ te podstawowe cząstki są lite, są nieporównanie twardsze od wszelkich porowatych ciał z nich zbudowanych, nawet od tych, które są tak twarde, że nigdy się nie ścierają ani nie rozbijają na kawałki; żadna zwyczajna moc nie może podzielić tego, co sam Bóg powołał do istnienia jako całość w chwili stworzenia.

Ten niezwykły fragment porusza kilka kwestii, na które powinniśmy zwrócić uwagę. Po pierwsze, Newton przyjmuje własność posiadania ustalonej masy za jedną z najbardziej podstawowych cech elementarnych składników materii. Używa określenia „masywne". W opinii Newtona masa nie jest czymś, co udałoby się wyjaśnić za pomocą prostszych pojęć. Jest ona częścią ostatecznego opisu materii; sięga do samych podstaw. Po drugie, Newton tłumaczy obserwowane przez nas w świecie zmiany wyłącznie poprzez zmiany ułożenia podstawowych składników materii – cząstek elementarnych. Składniki te same nigdy ani nie powstają, ani nie ulegają zniszczeniu – jedynie zmieniają swoje miejsce pobytu. Gdy Bóg już je stworzył, ich własności, w tym masa, nigdy nie ulegają zmianie. Newtonowska zerowa zasada dynamiki, zasada zachowania masy, jest konsekwencją wynikającą z tych dwóch punktów.

# Powrót do rzeczywistości

Czas już powrócić z krainy emocjonujących filozoficzno-teologicznych rozważań na temat tego, dlaczego zasada zachowania masy może (albo musi) być spełniona, do przyziemnego zagadnienia wykonania odpowiednich pomiarów i przekonania się, czy rzeczywiście *jest* ona prawdziwa.

W jaki sposób mierzy się masę? Najbardziej znany sposób polega na wykorzystaniu do tego wagi. Jeden z rodzajów wag, taki, który można spotkać w łazienkach osób odchudzających się, sprawdza, jak bardzo dane ciało (w tym przypadku ciało osoby na diecie) ściska znajdującą się w wadze sprężynę. Bardzo podobne są wagi używane przez wędkarzy, które mierzą, jak bardzo zwisające ciało (w tym przypadku ryba) rozciąga sprężynę. Stopień rozciągnięcia sprężyny (a w przypadku osób dbających o linię stopień jej ściśnięcia) jest wprost proporcjonalny do wywieranej przez ciało siły skierowanej w dół, którą nazywamy jego ciężarem. Siła ta jest wprost proporcjonalna do masy danego ciała.

W tym bardzo konkretnym i praktycznym przykładzie zasada zachowania masy stwierdza, że układ zamknięty będzie zawsze rozciągał sprężynę w takim samym stopniu, bez względu na to, co się dzieje w jego wnętrzu. Właśnie to potwierdził Antoine Lavoisier (1743–1784) – posługując się oczywiście dużo bardziej skomplikowaną i dokładniejszą wagą niż te, których używamy w łazienkach – przeprowadzając wiele żmudnych doświadczeń, dzięki którym zyskał tytuł „ojca współczesnej chemii". Lavoisier sprawdził, przeprowadziwszy różnorodne reakcje chemiczne, że całkowity ciężar wszystkich substancji na początku reakcji jest równy całkowitemu ciężarowi tego, co powstaje po jej zakończeniu – z dokładnością, z jaką mógł wówczas dokonywać pomiarów (zwykle była to dokładność mniej więcej jednej części na tysiąc). Dzięki skrupulatnemu uwzględnianiu *całej* materii biorącej udział w reakcji – przechwytywaniu gazów mogących się ulotnić, zbieraniu odłamków po wybuchach i tak dalej – udało mu się odkryć nowe związki i pierwiastki chemiczne. Lavoisier został ścięty na gilotynie w czasie

rewolucji francuskiej. Matematyk Joseph Lagrange powiedział: „Ścięcie tej głowy zabrało jedynie chwilę, ale Francja być może i za sto lat nie wyda drugiego umysłu mogącego się z nią równać”.

Posługiwanie się wagą do porównywania mas jest sposobem praktycznym i skutecznym, ale nie nadaje się on do sformułowania ogólnej, opartej na zasadach fizycznych definicji masy. Jeżeli na przykład wyniesiecie swoje ciało w przestrzeń kosmiczną, jego ciężar mierzony za pomocą wagi będzie malał, ale masa pozostanie taka sama. (Waga będzie kłamała, ale obwód w pasie się od tego nie skurczy). Lepiej, żeby masa nie zmieniała się, jeżeli zasada jej zachowania ma być prawdziwa! Z tego błędnego koła jest jednak wyjście, ponieważ masy można porównywać również w inny sposób. Można na przykład sprawdzić, jak dwie kule armatnie rozpoczynają swój lot po wystrzeleniu ich z tego samego działa. Zgodnie z innymi zasadami dynamiki Newtona dany impuls spowoduje osiągnięcie prędkości odwrotnie proporcjonalnej do masy ciała. Zatem jeżeli pierwsza kula wyleci z prędkością dwukrotnie większą od drugiej, będzie to oznaczało, że ma masę o połowę mniejszą – i nie będzie miało znaczenia, czy doświadczenie to przeprowadzimy na powierzchni Ziemi czy w przestrzeni kosmicznej.

Nie będę się dalej zagłębiał w szczegóły mierzenia masy, wspomnę tylko, że istnieje wiele innych sposobów dokonywania pomiarów poza posługiwaniem się wagą i wystrzeliwaniem ciał z armaty, a także wiele metod weryfikacji ich wzajemnej spójności.

## Spadanie

Uczeni przez ponad dwieście lat uznawali poprawność zerowego prawa Newtona i uważali tak nie tylko dlatego, że zgadzało się ono z jakimś poglądem filozoficznym czy teologicznym. Uważano je za prawdziwe, ponieważ sprawdzało się w praktyce. Razem z pozostałymi zasadami dynamiki Newtona i jego prawem grawitacji zerowe prawo umożliwiło zdefiniowanie opisu matematycznego – mechaniki klasycznej – który ze wspaniałą dokładnością wyjaśnia

ruchy planet i ich księżyców, zadziwiające zachowanie żyroskopu i wiele innych zjawisk. Oprócz tego sprawdza się również doskonale w chemii.

Prawo to jednak nie zawsze działa. W rzeczywistości zasada zachowania masy czasami może zawieść w sposób wręcz spektakularny. W Wielkim Zderzaczu Elektronowo-Pozytonowym (LEP, *Large Electron-Positron Collider*), który w latach dziewięćdziesiątych XX wieku działał w laboratorium CERN w pobliżu Genewy, rozpędzano elektrony i pozytony (antyelektrony) do prędkości mniejszej od prędkości światła zaledwie o mniej więcej jedną część na sto miliardów ($10^{-11}$). Pędzące po obwodzie akceleratora w przeciwnych kierunkach cząstki zderzano ze sobą, doprowadzając do powstania mnóstwa różnych szczątków. W wyniku takiego typowego zderzenia mogło na przykład powstać dziesięć mezonów *π* (pionów), proton i antyproton. Porównajmy teraz całkowite masy, przed zderzeniem i po nim:

elektron + pozyton: $2 \times 10^{-28}$ grama
10 pionów + proton + antyproton: $6 \times 10^{-24}$ grama

Powstałe w wyniku zderzenia produkty ważą około *trzydziestu tysięcy* razy więcej niż cząstki przed zderzeniem. O rety!

Niewiele praw w historii nauki sprawdzono tak dokładnie jak zasadę zachowania masy – wydawało się, że trudno o prawo bardziej podstawowe, z większą liczbą sukcesów na koncie. A jednak w tym przypadku zawiodło na całej linii. Jak gdyby jakiś magik wrzucił do kapelusza dwa ziarenka grochu i wyciągnął z niego kilkadziesiąt królików. Matka Natura nie jest jednak jarmarczną kuglarką; jej „magia” to głęboka prawda. Czeka nas sporo wyjaśniania.

## Czy masa miała swój początek?

Dopóki sądzono, że masa jest zachowywana, pytanie o jej pochodzenie nie miało żadnego sensu. Zawsze była taka sama. Równie dobrze można by pytać o pochodzenie liczby 42. (Tak naprawdę istnieje pewnego rodzaju wyjaśnienie. Jeżeli masa jest zawsze zachowana, z wyjątkiem sytuacji, w której Bóg stwarza cząstki elementarne, to w takim przypadku źródłem masy jest Bóg. Tak brzmiała odpowiedź Newtona. Jednak w naszej książce nie tego rodzaju wyjaśnień będziemy poszukiwali).

Trudno sobie wyobrazić, żeby w ramach mechaniki klasycznej sensownie brzmiała jakakolwiek odpowiedź na pytanie „Jakie jest pochodzenie masy?". Próba stworzenia ciał obdarzonych masą z obiektów bezmasowych prowadzi do sprzeczności. Można sobie to uświadomić na wiele sposobów. Na przykład:

- Istotą mechaniki klasycznej jest równanie $F = ma$. Wiąże ono dynamiczne pojęcie siły ($F$), opisujące wpływ wywierany na ciało, z kinematycznym pojęciem przyspieszenia ($a$), które mówi, jak ciało porusza się w odpowiedzi na działanie siły. Masa ($m$) pełni funkcję mediatora między tymi dwoma pojęciami. W odpowiedzi na daną siłę ciało o małej masie rozpędzi się szybciej niż obiekt o masie znacznie większej. Ciało o masie zerowej zacznie szaleć! Aby stwierdzić, jak będzie się ono poruszało, musimy wykonać dzielenie przez zero, a tego się nie robi. Lepiej więc, żeby ciała miały jakąś masę.
- Zgodnie z prawem grawitacji Newtona każde ciało wywiera wpływ grawitacyjny proporcjonalny do jego masy. Jeżeli spróbujemy sobie wyobrazić, jak ciało o niezerowej masie powstaje z bezmasowych składników, wpadniemy od razu w sprzeczność. Wpływ grawitacyjny każdego z tych elementów składowych wynosi zero i nieważne, ile razy dodamy do siebie zerowy wpływ, i tak dostaniemy w wyniku zero.

Jeżeli jednak masa nie jest zachowywana – a nie jest! – możemy szukać jej źródła. Masa nie jest niewzruszoną skałą. Możemy drążyć głębiej.

3 Klasyczną analizą podstaw mechaniki jest książka *The Science of Mechanics* Ernsta Macha. Einstein w czasie studiów uważnie ją przeczytał i zawarte w niej krytyczne omówienie newtonowskich pojęć absolutnej przestrzeni i czasu naprowadziło go na ideę względności. Napisał: „Nawet [James Clerk] Maxwell

i [Heinrich] Hertz, których z perspektywy czasu postrzegamy jako uczonych obalających wiarę w mechanikę jako ostateczną podstawę wszelkiego fizycznego myślenia, w swoich świadomych rozmyślaniach trzymali się mechaniki pełniącej funkcję pewnego gruntu fizyki. To Ernst Mach w swojej historii mechaniki (*Geschichte der Mechanik*) wstrząsnął tą dogmatyczną wiarą. Książka ta właśnie dlatego wywarła na mnie głęboki wpływ w czasie studiów. Wielkość Macha widzę w jego niezachwianym sceptycyzmie i niezależności". Aby poznać poglądy samego Newtona, wyrażone jego słowami, warto zajrzeć do książki *Newton's Philosophy of Nature*. Inną, historyczną i filozoficzną perspektywę można poznać, czytając książkę *The Concept of Mass* Maxa Jammera..

# Rozdział 3

# Drugie prawo Einsteina

*„Drugie prawo" Einsteina, m = E/c 2, stawia pytanie o to, czy masę można rozumieć na głębszym poziomie jako formę energii. Czy to możliwe, że uda nam się wytworzyć, jak to ujął Wheeler, „masę bez masy"?*

Gdy zaczynałem prowadzić zajęcia w Princeton, mój przyjaciel i opiekun naukowy Sam Treiman poprosił, żebym przyszedł do jego biura. Chciał się ze mną podzielić swoim doświadczeniem. Wyciągnął z biurka jakiś poważnie sfatygowany już podręcznik i powiedział:

– W czasie drugiej wojny światowej marynarka wojenna musiała szkolić rekrutów tak, żeby jak najszybciej byli w stanie usiąść przy radiostacji i zająć się zapewnieniem odpowiedniej komunikacji. Wielu z tych nowo powołanych żołnierzy trafiło do wojska prosto z farmy, szybkie przysposobienie ich do służby było więc nie lada wyzwaniem. Dzięki temu wspaniałemu podręcznikowi marynarce udało się tego dokonać. To arcydzieło pedagogiki. Szczególnie pierwszy rozdział. Zobacz sam.

Podał mi książkę otwartą na pierwszym rozdziale. Był on zatytułowany: „Trzy prawa Ohma". Ja znałem tylko jedno prawo Ohma – słynny związek $V = IR$ łączący ze sobą napięcie ($V$), natężenie prądu ($I$) i opór ($R$). Okazało się, że jest to pierwsze prawo Ohma.

Zżerała mnie ciekawość, jak wyglądają pozostałe dwa prawa. Zacząłem więc kartkować wątłe, pożółkłe strony podręcznika i wkrótce odkryłem, że drugie prawo Ohma brzmi: $I = V/R$.

Domyśliłem się wtedy, że trzecim prawem jest zapewne $R = V/I$, i okazało się, że nie byłem w błędzie.

## Odkrywanie nowych praw – metoda uproszczona

Każdy, kto ma choć trochę doświadczenia w operowaniu algebrą na poziomie podstawowym, z miejsca zauważy, że te trzy równania są sobie równoważne i cała historia obróci się dla niego w zwykły żart. Ma ona jednak głębszy sens. (Jest również pewna bardziej prozaiczna kwestia, na którą, jak sądzę, Sam chciał zwrócić mi wówczas uwagę. Ucząc żółtodziobów, należy powtarzać wielokrotnie tę samą rzecz, za każdym razem przedstawiając ją nieco inaczej. Powiązania, które dla wszystkich obeznanych z tematem są ewidentne, dla osób, które dopiero uczą się danej dziedziny, mogą być trudniejsze do zauważenia. I nawet jeżeli niektórzy studenci zauważą, że wałkujemy sprawy oczywiste, zapewne nie będzie im to przeszkadzać. Mało kto obraża się, gdy może poczuć dumę z własnej inteligencji).

Wspomniany wcześniej głębszy sens ma związek z pewną wypowiedzią wielkiego fizyka teoretyka Paula Diraca. Gdy zapytano go kiedyś o to, w jaki sposób odkrywa prawa przyrody, odpowiedział: „Bawię się równaniami". Sednem tego stwierdzenia jest fakt, że różne sposoby zapisania tego samego równania mogą sugerować całkowicie odmienne zjawiska, nawet jeżeli logicznie równania te są równoważne.

## Drugie prawo Einsteina

Drugie prawo Einsteina brzmi:

$$m = E/c^2$$

Oczywiście pierwszym prawem Einsteina jest słynne równanie $E = mc^2$. Jak wszyscy wiedzą, to pierwsze prawo mówi o możliwości uzyskania olbrzymiej energii z niewielkiej ilości materii. Przywodzi ono na myśl reaktory jądrowe i bomby atomowe.

Drugie prawo Einsteina kojarzy się z czymś zupełnie innym. Sugeruje ono możliwość wyjaśnienia sposobu powstawania materii z energii. Tak naprawdę określenie „drugie prawo" jest błędne. W oryginalnym artykule Einsteina z 1905 roku nie znajdziemy równania $E = mc^2$. Zobaczymy za to zapis: $m = E/c^2$. (Może więc powinniśmy nazywać tę jego postać zerowym prawem Einsteina?). Co więcej, tytułem wspomnianego artykułu jest pytanie: „Czy bezwładność ciała zależy od jego zawartości energetycznej?". Innymi słowy: czy część masy danego ciała pochodzi od energii zawartych w nim substancji? Od samego początku Einstein zastanawiał się nad pojęciowymi podstawami fizyki, a nie nad możliwością konstruowania bomb czy reaktorów.

Pojęcie energii odgrywa we współczesnej fizyce dużo ważniejszą rolę niż masa. Można się o tym przekonać na wiele sposobów. To energia, a nie masa, jest w rzeczywistości zachowywana. To energia pojawia się w podstawowych równaniach, takich jak przedstawione przez Boltzmanna równania mechaniki statystycznej, równanie Schrödingera z zakresu mechaniki kwantowej i równanie Einsteina opisujące grawitację. Masa pojawia się w bardziej specjalistycznych kontekstach na oznaczenie nieredukowalnych reprezentacji grupy Poincarégo. (Nawet nie będę próbował wyjaśniać tego stwierdzenia – na szczęście, sam fakt jego przytoczenia wystarczy, by dowieść słuszności postawionej przeze mnie tezy).

Pytanie Einsteina rzuca nam zatem wyzwanie. Jeżeli uda się wyjaśnić masę za pomocą energii, udoskonalimy nasz opis świata. W naszym przepisie na świat lista potrzebnych składników ulegnie skróceniu.

Dzięki drugiemu prawu Einsteina zaczniemy się teraz zastanawiać nad odpowiedzią na pytanie, które wcześniej odrzuciliśmy. Skąd wzięła się masa? Być może jej źródłem jest energia. Jak się przekonamy, w rzeczywistości w znacznej mierze tak właśnie jest.

# FAQ – najczęściej zadawane pytania

Oto dwa świetne pytania, które często padają, gdy wygłaszam wykłady popularnonaukowe na temat pochodzenia masy. Jeżeli również wam one zaświtały – moje gratulacje! Pytania te dotyczą podstawowych kwestii związanych z możliwością wyjaśnienia masy za pomocą energii.

Pytanie 1: Ze wzoru $E = mc^2$ wynika, że masa jest wprost proporcjonalna do energii. Jeśli więc energia jest zachowywana, czy nie oznacza to, że zasada zachowania odnosi się również do masy?

Odpowiedź 1: Odpowiadając krótko, zauważmy, że równanie $E = mc^2$ stosuje się jedynie do pojedynczych ciał znajdujących się w spoczynku. Szkoda, że równanie to, najbardziej znane równanie fizyki, jest w istocie rzeczy trochę ułomne. W ogólnych przypadkach, gdy mamy do czynienia z ciałami w ruchu albo z ciałami wzajemnie na siebie oddziałującymi, energia i masa nie są do siebie wprost proporcjonalne. W tych sytuacjach wzór $E = mc^2$ po prostu nie ma zastosowania.

Pełniejszą odpowiedź na to pytanie można znaleźć w dodatku A: „Cząstki mają masę, świat ma energię".

Pytanie 2: Jak to możliwe, żeby coś, co powstało z bezmasowych elementów składowych, mogło odczuwać wpływ siły grawitacyjnej? Czyż Newton nie powiedział, że siła grawitacyjna działająca na ciało jest wprost proporcjonalna do jego masy?

Odpowiedź 2: W swoim prawie grawitacji Newton rzeczywiście mówi, że siła grawitacyjna, jaką odczuwa dane ciało, jest wprost proporcjonalna do jego masy. Einstein z kolei w swojej dokładniejszej teorii grawitacji – ogólnej teorii względności – mówi coś innego. Pełny obraz jest zbyt złożony, aby go tu opisać, nie będę więc nawet próbował. Mówiąc jednak bardzo ogólnie, możemy przyjąć, że tam gdzie Newton mówił, iż siła jest wprost proporcjonalna do $m$, dokładniejsza teoria Einsteina stwierdza, że jest ona proporcjonalna do $E/c^2$. Jak zauważyliśmy przy okazji odpowiedzi na poprzednie pytanie, wielkości te nie są dokładnie tym samym. Są one niemal równe w przypadku pojedynczych,

poruszających się powoli ciał, ale mogą być zupełnie różne, gdy w grę wchodzą układy ciał lub ciała poruszające się z prędkościami bliskimi prędkości światła.

Tak naprawdę samo światło może być tu najlepszym przykładem. Cząstki światła, fotony, mają zerową masę. Mimo to światło ulega zakrzywieniu pod wpływem grawitacji, ponieważ fotony mają niezerową energię, a grawitacja energię przyciąga. Jedno z najsłynniejszych doświadczeń przeprowadzonych w celu sprawdzenia ogólnej teorii względności polegało na zaobserwowaniu właśnie zakrzywienia światła przechodzącego w pobliżu Słońca. W tym przypadku grawitacja Słońca spowodowała zakrzywienie toru ruchu bezmasowych fotonów.

Rozwijając tę myśl, można dojść do wniosku, że jedną z najbardziej spektakularnych konsekwencji ogólnej teorii względności jest możliwość istnienia obiektu o tak silnej grawitacji, że zakrzywia ona tor ruchu fotonów do tego stopnia, iż promienie światła zawracają – nawet jeżeli na samym początku były skierowane prosto na zewnątrz. Obiekt taki uwięzi fotony. Żadne światło nie będzie mogło się z niego wydostać. Jest po prostu czarną dziurą.

# Rozdział 4

# Co liczy się w materii

*Z czego zbudowany jest świat? Z dokładnością do 95% wyjaśnimy wkrótce, jak masa materii powstała z czystej energii. Aby uzyskać taką dokładność, musimy bardzo wyraźnie określić, o czym mówimy. W tym rozdziale jasno powiemy, czym zwykła materia jest, a czym nie jest.*

„Zwykła" materia jest tym, czym zajmuje się chemia, biologia i geologia. Jest tym wszystkim, z czego konstruujemy różne przedmioty, i tym, z czego sami się składamy. Zwykłą materią jest również wszystko to, co astronomowie widzą przez teleskopy. Planety, gwiazdy i mgławice zbudowane są z tego samego, co znajdujemy i badamy tu, na Ziemi. Na tym polega największe odkrycie astronomii.

Niedawno jednak astronomowie dokonali innego wielkiego odkrycia. Okazało się mianowicie, co zakrawa na ironię, że normalna materia *nie* jest wszystkim, co istnieje we Wszechświecie. Nawet w przybliżeniu. W rzeczywistości większa część masy całego Wszechświata ma postać przynajmniej dwóch innych składników: tak zwanej ciemnej materii i ciemnej energii. Owe „ciemne" składniki są tak naprawdę doskonale przezroczyste – dlatego właśnie przez setki lat nie mogliśmy ich zauważyć. Jak dotąd udało się je wykryć jedynie pośrednio, poprzez obserwacje wpływu grawitacyjnego, jaki wywierają na zwykłą materię (to znaczy, gwiazdy i galaktyki). W dalszych rozdziałach wiele jeszcze powiemy na temat tej ciemnej strony Wszechświata.

Jeżeli zsumuje się całkowitą masę, to okaże się, że zwykła materia jest jedynie niewielką domieszką i stanowi zaledwie 4–5% całkowitej masy Wszechświata. A jednak to właśnie za jej sprawą w świecie wykształciła się struktura, informacja i miłość. Mam więc nadzieję, że zgodzicie się ze mną, iż jest to szczególnie interesujący fragment Wszechświata. Poza tym nie ulega wątpliwości, że ten właśnie fragment udało nam się najlepiej poznać.

W kolejnych rozdziałach wyjaśnimy pochodzenie 95% masy zwykłej materii[4], wychodząc od jej bezmasowych elementów podstawowych. Aby spełnić tę obietnicę, musimy bardzo jasno sprecyzować, co tak naprawdę będziemy wyjaśniać. (W końcu przytaczamy tu konkretne liczby).

## Elementy składowe

Domysły, że materię[5] można sprowadzić do kilku rodzajów podstawowych elementów składowych, pojawiły się już co najmniej w starożytnej Grecji, ale niebudzące wątpliwości, naukowe zrozumienie tego faktu osiągnęliśmy dopiero w XX wieku. Zwykle mówi się, że materia składa się z atomów. Wielki fizyk Richard Feynman na początku swoich słynnych *Feynmana wykładów z fizyki* uczynił z tego stwierdzenia bardzo istotną kwestię:

> Gdyby cała nauka miała ulec zniszczeniu w jakimś kataklizmie i tylko jedno zdanie można by uratować od zagłady i przekazać następnym pokoleniom, jakie zdanie zawierałoby największą ilość informacji w możliwie najmniejszej liczbie słów? W moim przekonaniu byłoby to zdanie formułujące *hipotezę* (lub *rzeczywistość*, jeśli wolicie tak to nazwać) *atomistyczną*, że *wszystko składa się z atomów* (…)[6] (wyróżnienia pochodzą od Feynmana)

Ten wielki i niezwykle użyteczny fakt, że wszystko składa się z atomów, jest jednak niepełny pod trzema istotnymi względami. (Podobnie jak zerowe prawo Newtona czy największe odkrycie astronomii jest on „głęboką prawdą" w sensie, jaki nadawał temu określeniu Bohr – to znaczy, jest on również *głęboko* fałszywy).

Jednym z dowodów wskazujących na niekompletność tego stwierdzenia jest istnienie ciemnej materii i ciemnej energii, o czym już wcześniej wspomnieliśmy. W 1963 roku, gdy po raz pierwszy ukazały się wykłady Feynmana, zaledwie podejrzewano, że mogą one istnieć. Kilku astronomów, z Fritzem Zwickym na czele, już w 1933 roku zajęło się zagadnieniem, które nazwali problemem brakującej masy. Jednak zauważone przez nich anomalie były jednymi z wielu w powstającej dopiero kosmologii obserwacyjnej i przez długi czas tylko nieliczni uczeni traktowali ten problem poważnie. Tak czy inaczej, istnienie ciemnej materii i ciemnej energii nie ma znaczenia dla istoty wygłoszonej przez Feynmana uwagi. W początkowych etapach odtwarzania wiedzy naukowej po kataklizmie świadomość istnienia ciemnej materii i ciemnej energii byłaby zbytkiem stanowiącym zbędny balast.

Dwie pozostałe, dużo bardziej przyziemne poprawki są naprawdę ważne. Powinny się one znaleźć nawet w jednozdaniowej wiadomości dla następnych pokoleń, nawet jeśli z tego powodu zdanie to miałoby się stać dłuższym, pisanym jednym ciągiem, z rodzaju tych, których nauczyciele kazali mi unikać i które kosztowałyby mnie utratę punktu za wypracowanie, mimo że Henry James i Marcel Proust zdobyli sławę, pisząc takie właśnie zdania, ponieważ styl taki jest akceptowany, gdy tworzy się literaturę, ale nie jest odpowiedni, gdy chce się jedynie przekazać jakąś informację.

Po pierwsze, należy się zająć kwestią światła. Jest ono najważniejszym elementem „wszystkiego" i nie ulega wątpliwości, że różni się znacznie od atomów. Mamy naturalną predyspozycję, by uważać światło za coś diametralnie odmiennego od materii; za coś niematerialnego, a nawet duchowego. Bez wątpienia *wydaje się* ono inne od namacalnej materii – takiej, o którą można się skaleczyć, jeśli się ją kopnie, albo która pod postacią strumieni i wiatrów może popychać nas wte i wewte. Należałoby więc

powiedzieć ocalonym z kataklizmu hipotetycznym istotom Feynmana, że światło jest inną formą materii, którą można zrozumieć. Można by im nawet przekazać, że ono również składa się z cząstek, które nazywamy fotonami.

Po drugie, atomy nie stanowią końca tej opowieści – są zbudowane z jeszcze bardziej podstawowych składników. Kilka mówiących o tym wskazówek pomogłoby istotom, które przeżyły kataklizm, poczynić szybko duże postępy na drodze do odtworzenia chemii i elektroniki.

Odpowiednie fakty można podsumować w kilku stwierdzeniach. (Nie będę próbował zawierać wszystkiego w jednym zdaniu). Wszystko składa się z atomów i fotonów. Atomy z kolei składają się z elektronów i jąder atomowych. Jądra atomowe są znacznie mniejsze od całych atomów (promień jądra atomowego zajmuje w przybliżeniu jedną stutysięczną, czyli $10^{-5}$ promienia atomu), ale zawierają cały dodatni ładunek i prawie całą masę atomu (ponad 99,9%). Atomy utrzymują się w całości za sprawą przyciągania elektrycznego między elektronami a jądrem. I w końcu jądra atomowe składają się z kolei z protonów i neutronów. Jądra utrzymują się w całości dzięki działaniu jeszcze innej siły, znacznie mocniejszej od siły elektrycznej, która jednak działa jedynie na małych odległościach.

Taki opis materii odzwierciedla nasz stan wiedzy mniej więcej z 1935 roku. Informacje te wciąż można znaleźć w większości podręczników zawierających podstawowe wiadomości z zakresu fizyki. Aby należycie oddać nasze najlepsze obecne rozumienie tych zagadnień, będziemy musieli uściślić, zmodyfikować i poprawić prawie każde słowo w powyższym opisie. Dowiedzieliśmy się na przykład, że również protony i neutrony są obiektami złożonymi, składającymi się z bardziej podstawowych kwarków i gluonów. Wprowadzaniem tych poprawek zajmiemy się w późniejszych rozdziałach. Jednak ten obraz wiedzy z 1935 roku wciąż jest użytecznym i wygodnym schematem, przybliżonym zarysem, który pozwoli nam wyraźnie zobaczyć, co jeszcze musimy zrobić, by zrozumieć pochodzenie masy.

Większa część masy atomu znajduje się w jego jądrze, a ono składa się z protonów i neutronów. Elektrony wnoszą grubo poniżej 1% masy, a fotony jeszcze mniej. Zatem problem pochodzenia masy zwykłej materii przybiera bardzo konkretny kształt. By dowiedzieć się, skąd bierze się większa część masy materii – ponad 99% – musimy odkryć, co jest źródłem masy protonów i neutronów oraz zrozumieć, jak cząstki te łączą się ze sobą w jądra atomowe. Tylko tyle i aż tyle.

4 Jak się przekonamy, większość masy zwykłej materii można wyliczyć w ramach pewnej teorii, której elementami składowymi są bezmasowe gluony, pozbawione masy kwarki *u* oraz *d* i nic poza tym (nazywam tę teorię „lekką wersją QCD”). Lekka wersja QCD naprawdę daje początek masie bez masy. Nie jest jednak pełną teorią przyrody. Wiele zagadnień znajduje się poza jej zasięgiem, między innymi: elektromagnetyzm, grawitacja, elektrony oraz niewielkie masy właściwe kwarkom *u* i *d*. Na szczęście, możemy oszacować, jak bardzo to wszystko, co pozostało poza obrębem teorii, wpływa na masę zwykłej materii, możemy też zweryfikować te oszacowania, przeprowadzając rachunki opisane w rozdziale dziewiątym. Krótko mówiąc, wpływ pominiętych zjawisk zmienia oszacowania o mniej niż 5%. (Dla znawców tematu: największą różnicę robi kwark *s*. Jest zbyt ciężki, by traktować go jak cząstkę bezmasową, ale nie na tyle, by nie dało się go elegancko pozostawić poza sferą zainteresowań uproszczonej teorii).

5 Od tego miejsca aż do rozdziału ósmego, mówiąc o zwykłej materii, będę opuszczał przymiotnik zwykła i używał jedynie słowa materia. Ciemną stroną Wszechświata zajmiemy się dopiero później.

6 R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, Feynmana wykłady z fizyki, t. 1, cz. 1, przeł. Zofia Królikowska, PWN, Warszawa 2007, s. 21 (przyp. tłum.).

# Rozdział 5

# Ukryta hydra

*Program badawczy, którego celem było zrozumienie układów protonów i neutronów „na starą modłę” – jako połączonych ze sobą lub orbitujących wokół siebie cząstek – legł w gruzach. Fizycy dzięki poszukiwaniu sił działających między trwałymi cząstkami niespodziewanie odkryli zadziwiający nowy świat przemian i niestabilności.*

W roku 1930 nie ulegało wątpliwości, jaki powinien być kolejny krok w kierunku opracowania kompletnej teorii materii. W analitycznej podróży w głąb świata materialnego dotarliśmy do wnętrza atomów, do ich jąder.

Przeważająca część masy materii znajduje się w jądrach atomowych, a zawarte w nich ładunki są źródłem pola elektrycznego, które wywiera decydujący wpływ na ruch otaczających je elektronów. Ponieważ jądra są dużo cięższe, zazwyczaj poruszają się wolniej od elektronów. Można powiedzieć, że elektrony odgrywają główną rolę w procesach chemicznych i biologicznych (nie wspominając już o elektronice), ale za kulisami tego wszystkiego znajdują się jądra atomowe, które mają decydujący głos w sprawie scenariuszy przebiegu tych zjawisk.

Chociaż w biologii, chemii i elektronice jądra najczęściej nie wysuwają się na pierwszy plan, w przypadku gwiazd sytuacja ta ulega zmianie. To właśnie z przetasowań i przekształceń jądrowych gwiazdy, w tym oczywiście również nasze Słońce, czerpią

swoją energię. Dlatego nie ulegało wówczas wątpliwości (i wciąż nie ulega), że poznanie budowy jąder atomowych jest bardzo istotne.

Jednak w roku 1930 bardzo mało na ten temat wiedzieliśmy i powiększenie tej wiedzy stało się jednym z głównym zadań, jakie stawiali przed sobą fizycy. W czasie swoich wykładów Enrico Fermi malował w środku schematu atomu rozmyty obłok i podpisywał go „Dalej są tylko smoki" – jak na starych mapach pokazujących nieodkryte jeszcze obszary Ziemi. W tym właśnie miejscu przebiegała granica oddzielająca dziewiczy teren, który należało dopiero zbadać.

## Smoki Fermiego

Od samego początku nie ulegało wątpliwości, że światem jądrowym rządzą w zasadzie nowe siły. Klasycznymi siłami fizyki przedjądrowej były grawitacja i elektromagnetyzm. Jednak siły elektryczne działające wewnątrz jąder muszą odpychać od siebie cząstki: przecież wypadkowy ładunek elektryczny jądra jest dodatni, a ładunki o takim samym znaku się odpychają. Siła grawitacyjna działająca na niewielkie masy zawarte w dowolnym jądrze atomowym jest zdecydowanie zbyt słaba, żeby przezwyciężyć odpychanie siły elektrycznej. (W drugiej części książki będziemy jeszcze wiele mówić na temat słabości oddziaływania grawitacyjnego). Potrzebna była jakaś nowa siła. Nazwano ją oddziaływaniem silnym. Aby jądra atomowe mogły być tak zwarte, to nowe oddziaływanie musiało być mocniejsze od wszystkich znanych wcześniej sił.

Odkrycie podstawowych równań rządzących procesami zachodzącymi we wnętrzach jąder atomowych wymagało całych dziesięcioleci doświadczeń i rozważań teoretycznych. Zdumieniem napawa fakt, że udało nam się je wszystkie odkryć.

Oczywistą przeszkodą jest to, że przeprowadzenie obserwacji działania tych równań jest bardzo skomplikowane, ponieważ jądra atomowe są niezwykle małe – mniej więcej sto tysięcy razy mniejsze

od atomów. Mowa o odległościach sto tysięcy razy mniejszych od spotykanych w nanotechnologii. Jądra atomowe należą do obszaru mikronanotechnologii. Próbując przestawiać jądra atomowe za pomocą makroskopowych narzędzi – powiedzmy, za pomocą zwyczajnej pęsety – znaleźlibyśmy się w sytuacji gorszej niż olbrzym, który próbowałby podnieść ziarnko piasku, wykorzystując dwie wieże Eiffla w roli pałeczek. To nie lada wyzwanie. Aby zbadanie świata jąder atomowych było w ogóle możliwe, należało wynaleźć zupełnie nowe techniki doświadczalne i skonstruować niezwykłe przyrządy. W następnym rozdziale przyjrzymy się nanomikroskopowi ultrastroboskopowemu (znanemu jako Akcelerator Liniowy Uniwersytetu Stanforda, w skrócie SLAC, *Stanford Linear Accelerator*) i siłowni do wywoływania twórczej destrukcji (znanej jako Wielki Zderzacz Elektronowo-Pozytonowy, w skrócie LEP, *Large Electron-Positron Collider*), dzięki którym dokonano najistotniejszych dla naszej opowieści odkryć.

Inną przeszkodą jest fakt, że jak się okazało, mikronanokosmos rządzi się nowymi prawami, w niczym nieprzypominającymi czegokolwiek, co znaliśmy wcześniej. Aby odpowiednio opisać oddziaływanie silne, fizycy musieli najpierw wyzbyć się naturalnego dla ludzi sposobu myślenia i zastąpić go nowymi, niezwykłymi ideami. W kilku kolejnych rozdziałach omówimy te idee szczegółowo. Są one tak dziwne, że gdybyście chcieli je przyjąć po prostu za fakt, zapewne uznalibyście je – i słusznie – za niewiarygodne[7]. Niektóre z nich zupełnie nie przypominają czegokolwiek, co znaliśmy wcześniej. Może wam się wydawać, że zaprzeczają – i rzeczywiście może tak być! – temu, czego nauczono was w szkole. (To zależy od szkoły, do której chodziliście, i oczywiście od tego, kiedy to było). Rolą tego krótkiego rozdziału jest wyjaśnienie, dlaczego musiało dojść do rewolucji w nauce. Służy on powiązaniu tradycyjnego opisu fizyki jądrowej (jaki wciąż można znaleźć w większości przeglądanych przeze mnie podręczników do szkół średnich i uniwersyteckich kursów wprowadzających do fizyki) z nowym rozumieniem tej nauki.

# Walka ze smokami

Kamieniem milowym stało się odkrycie neutronu, dokonane w 1932 roku przez Jamesa Chadwicka. Po tym odkryciu wydawało się, że ścieżka do pełnego zrozumienia jest już prosta. Fizycy sądzili, że wszystkie elementy składowe jądra atomowego są już znane – są nimi protony i neutrony, dwa rodzaje cząstek o takim samym mniej więcej ciężarze (neutron jest około 0,2% cięższy), podatne na wpływ podobnych oddziaływań *silnych*. Najbardziej oczywistą różnicą między protonami i neutronami jest fakt, że protony mają dodatni ładunek elektryczny, natomiast neutrony są elektrycznie obojętne, oraz to, że wyodrębniony z jądra neutron jest nietrwały i przeciętnie po mniej więcej piętnastu minutach ulega rozpadowi na proton (oraz elektron i antyneutrino). Łącząc ze sobą protony i neutrony, można by skonstruować modelowe jądra o różnych ładunkach i masach, odpowiadające mniej więcej znanym jądrom atomowym występującym w naturze.

Wydawało się, że zrozumienie i udoskonalenie tego modelowania wymagało jedynie zmierzenia sił działających między protonami i neutronami. To dzięki nim jądra atomowe utrzymują się w całości. Równania opisujące te siły stałyby się teorią oddziaływania silnego. Rozwiązując równania tej teorii, moglibyśmy zarówno ją zweryfikować, jak i przewidzieć różne rzeczy. W ten sposób napisalibyśmy zgrabny nowy rozdział fizyki zatytułowany „Fizyka jądrowa", którego najistotniejszym elementem byłaby „siła jądrowa" zapisana prostym, eleganckim równaniem.

Czerpiąc inspirację z takiego programu, fizycy doświadczalni badali bliskie spotkania protonów z innymi protonami (albo neutronami czy innymi jądrami). Tego typu doświadczenia, w których rozpędza się jedną cząstkę w kierunku drugiej i bada, co z tego wynika, nazywamy eksperymentami z rozpraszaniem. Pomysł polega na tym, żeby zmierzyć, w jaki sposób protony i neutrony będą wykonywać gwałtowne zwroty – czyli, jak mówią fizycy, ulegać rozproszeniu – i na tej podstawie wydedukować, jaka siła mogła do tego doprowadzić.

Taka bezpośrednia strategia badań zawiodła jednak na całej linii. Po pierwsze, badana siła okazała się bardzo skomplikowana. Fizycy przekonali się, że zależy ona nie tylko od odległości między cząstkami, lecz także od ich prędkości i kierunków ich spinów[8], a do tego zależność ta jest skomplikowana i zupełnie bezładna. Szybko stało się jasne, że nie uda się znaleźć żadnego prostego i pięknego prawa opisującego tę siłę, godnego zająć miejsce obok prawa grawitacji Newtona i prawa Coulomba, opisującego oddziaływanie ładunków elektrycznych.

Po drugie, odkryto coś jeszcze gorszego: okazało się, że owa „siła" nie jest w ogóle siłą. Fizycy przekonali się, że gdy wystrzeli się ku sobie dwa protony o dużej energii, wcale *nie* robią one jedynie gwałtownego zwrotu. Bardzo często w wyniku takiego zderzenia pojawiają się więcej niż dwie cząstki, i do tego niekoniecznie są to protony. W ten właśnie sposób, w trakcie eksperymentów z rozpraszaniem wysokoenergetycznych cząstek, fizycy odkryli wiele nowych rodzajów cząstek. Te nowe cząstki – ostatecznie odkryto ich dziesiątki – są nietrwałe, dlatego w normalnych warunkach nie występują w przyrodzie. Jednak po ich dokładniejszym zbadaniu fizycy doszli do wniosku, że ich pozostałe własności – w szczególności podatność na oddziaływanie silne i rozmiar – są podobne do własności protonów i neutronów.

Po dokonaniu takich odkryć nie można już było zajmować się wyłącznie samymi protonami i neutronami ani uważać, że kwestią podstawową wciąż pozostaje określenie sił działających jedynie między tymi cząstkami. Tradycyjnie pojmowana „fizyka jądrowa" stała się częścią większej dziedziny, obejmującej wszystkie znane cząstki i skomplikowane, jak się wydawało, procesy rządzące ich powstawaniem i rozpadem. Wymyślono nowe słowo na określenie owego zoo cząstek elementarnych, tego nowego gatunku smoków. Nazwano je hadronami.

## Hydra

Biorąc przykład ze sposobu, w jaki rozwijała się chemia, uczeni doszli do wniosku, że wyjaśnienie całej tej złożoności jest możliwe. Może protony i neutrony oraz pozostałe hadrony nie są cząstkami elementarnymi? Może same składają się z bardziej podstawowych obiektów o prostszych własnościach?

Przecież jeżeli przeprowadzimy doświadczenia z atomami i cząsteczkami podobne do tych, jakich dokonano z protonami i neutronami, a potem zbadamy efekty takich bliskich spotkań, również uzyskamy bardzo skomplikowane wyniki. Może dojść do przetasowań i rozbić powodujących powstanie nowych typów cząsteczek (albo atomów w stanie wzbudzonym, jonów czy rodników) – innymi słowy, może dojść do reakcji chemicznych. Proste prawo sił stosuje się jedynie do leżących u podstaw tego procesu elektronów i jąder atomowych. Atomy i cząsteczki utworzone z wielu elektronów i jąder atomowych takimi prostymi prawami już się nie rządzą. Czy to możliwe, że podobnie rzecz ma się z protonami, neutronami i ich niedawno odkrytymi krewnymi? Czy ich obserwowana złożoność może być wynikiem misternej struktury wewnętrznej, skonstruowanej z podstawowych elementów, które rządzą się zdecydowanie prostszymi prawami?

Rozbijanie czegokolwiek na kawałki może wydawać się prostackie, ale to murowany sposób, by dowiedzieć się, z czego dana rzecz jest zrobiona. Jeżeli dwa atomy zderzymy ze sobą wystarczająco mocno, rozbiją się na tworzące je elektrony i jądra atomowe. W ten sposób można się przekonać, z czego są zbudowane.

Poszukiwania prostszych elementów składowych wewnątrz protonów i neutronów natrafiły jednak na niespodziewane trudności. Jeśli zderzy się ze sobą protony naprawdę mocno, to w wyniku takiej kolizji pojawi się… więcej protonów, czasami w towarzystwie ich hadronowych krewniaków. Typowym wynikiem zderzenia dwóch protonów o wysokiej energii może być pojawienie się trzech protonów, antyneutronu i kilku mezonów *π* (pionów). Całkowita masa cząstek pojawiających się po zderzeniu jest większa od sumy mas cząstek przed zderzeniem. Już wcześniej wspomnieliśmy o tej możliwości i proszę, znowu nas tutaj prześladuje. Zamiast odkrywania mniejszych, lżejszych elementów składowych w miarę

zwiększania energii i przeprowadzania coraz silniejszych zderzeń, uzyskujemy jedynie coraz więcej tego samego. Nic nie wskazuje na to, żeby dochodziło tu do jakiegoś uproszczenia. To tak, jak gdybyśmy rozbili o siebie dwie antonówki i uzyskali w efekcie trzy antonówki, papierówkę, melona, dziesięć czereśni i dwie cukinie!

Smok Fermiego przekształcił się w koszmarną mitologiczną hydrę. Gdy ktoś odrąbał jej kawałek, z odciętych części natychmiast wyrastały kolejne hydry.

*Istnieją* jednak prostsze elementy składowe, ale ich zasadnicza „prostota" wiąże się z dziwacznym i pełnym paradoksów zachowaniem, co sprawia, że wymagają one rewolucyjnych zmian w teorii i rozwoju techniki doświadczalnej w celu zaobserwowania tych trudnych do uchwycenia bytów. Aby je zrozumieć – a nawet aby je *zauważyć* – musimy zacząć wszystko od początku.

7 Pod koniec książki omówimy inne niezwykłe idee, za którymi przemawiają jeszcze mniej przekonujące dowody. Mam nadzieję, że zauważycie tę różnicę!

8 Zarówno protony, jak i neutrony bezustannie wirują – mówimy, że cząstki te mają sobie właściwy, podstawowy spin (fizycy nazywają tę cechę słowem pochodzącym od angielskim czasownika to spin – „wirować"). W dalszej części książki powiemy jeszcze dużo na temat tej fundamentalnej własności. Ma ona kluczowe znaczenie dla współczesnych pomysłów na rozwiązanie kwestii ostatecznej unifikacji sił.

# Rozdział 6

# Bity bytu

*Kwarki, wprowadzone w ramach teoretycznej improwizacji bez wcześniejszego zaobserwowania ich jako samodzielnych cząstek, wydawały się początkowo jedynie wygodną fikcją. Gdy jednak zobaczono je na ultrastroboskopowych nanomikroskopowych zdjęciach protonów, stały się uciążliwą rzeczywistością. Swoim niezwykłym zachowaniem kwestionowały podstawowe zasady mechaniki kwantowej i teorii względności. W pewnej nowej teorii kwarki pojawiły się jako idealne obiekty o matematycznej doskonałości. Równania tej teorii wymagały również istnienia innych cząstek – gluonów przenoszących ładunek koloru. Kilka lat później robiono już zdjęcia zarówno kwarków, jak i gluonów dzięki wykorzystaniu specjalnie w tym celu zbudowanych siłowni wywołujących twórczą destrukcję.*

Tytuł tego rozdziału można odczytywać dwojako. Po pierwsze można zauważyć, że podobnie jak w informatyce bity są częściami składowymi większych jednostek informacji, tak w protonach i neutronach, które jeszcze do niedawna uważano za podstawowe elementy zwykłej materii, odnaleziono jeszcze mniejsze składniki. Te mniejsze składniki nazwano kwarkami i gluonami. Oczywiście, sama znajomość nazwy czegoś nie mówi nam jeszcze nic o tym, z czym mamy do czynienia – jak to wyjaśnia Szekspir ustami Romea:

> Cóż znaczy nazwa? To co zwiemy różą,
> Pod inną nazwą nie mniej by pachniało[9].

Tym sposobem dochodzimy do drugiego, znacznie głębszego znaczenia tytułu. Gdyby kwarki i gluony były jedynie kolejną warstwą nieskończonego ciągu struktur zawartych wewnątrz innych struktur, ich nazwy pozostałyby imponująco brzmiącymi terminami naukowymi, którymi można by się popisywać na przyjęciach, ale same w sobie budziłyby zaciekawienie jedynie u specjalistów. Kwarki i gluony nie są jednak „tylko kolejną warstwą". Jeżeli pojmie się je dogłębnie, w zasadniczy sposób odmieniają nasze rozumienie natury fizycznej rzeczywistości. Są one bowiem bitami również w innym, znacznie głębszym sensie – takim samym, jaki mamy na myśli, mówiąc o bitach informacji. Do pewnego stopnia jest to sytuacja jakościowo nowa w nauce – są one *ucieleśnieniem idei*.

Aby zrozumieć, co mam na myśli, zauważmy na przykład, że równania opisujące gluony poznaliśmy na długo przed odkryciem samych cząstek. Są one częścią klasy równań, która pojawiła się w opisie matematycznym wprowadzonym przez Chena Ninga Yanga i Roberta Millsa w 1954 roku[10] jako naturalne matematyczne uogólnienie równań elektrodynamiki odkrytych przez Maxwella. Równania Maxwella od dawna podziwiano za ich symetrię i siłę. Heinrich Hertz, niemiecki fizyk, który dowiódł doświadczalnie istnienia fal elektromagnetycznych przewidzianych przez równania Maxwella (obecnie nazywanych falami radiowymi), tak o tych równaniach powiedział:

> Trudno oprzeć się wrażeniu, że te wzory matematyczne żyją niezależnym życiem i posiadają własną inteligencję, że są mądrzejsze od nas samych, mądrzejsze nawet od swoich odkrywców, że dowiadujemy się za ich pomocą więcej, niż pierwotnie w nich zapisano.

Równania Yanga–Millsa są rozrośniętą wersją równań Maxwella. Obejmują wiele rodzajów ładunków zamiast tylko jednego (ładunku elektrycznego), który pojawia się w równaniach Maxwella, i uwzględniają ich symetrię. W 1973 roku razem z Davidem Grossem przedstawiliśmy pewną wersję owych równań, którą stosuje się

do istniejących w rzeczywistym świecie gluonów oddziaływania silnego (wykorzystującego trzy ładunki). Owe trojakie ładunki występujące w teorii oddziaływania silnego nazywa się zwykle ładunkami koloru albo skrótowo: kolorem, chociaż oczywiście z barwami w potocznym sensie tego słowa nie mają one nic wspólnego.

Za chwilę zajmiemy się omówieniem szczegółów technicznych związanych z kwarkami i gluonami. W tym miejscu jednak, na samym początku, poczynając od tytułu rozdziału, chciałbym podkreślić, że kwarki i gluony, a mówiąc dokładnie ich pola, są obiektami matematycznie pełnymi i doskonałymi. Ich własności można w pełni opisać, wykorzystując same tylko pojęcia, bez potrzeby analizowania próbek statystycznych lub dokonywania jakichkolwiek pomiarów[11]. I własności tych nie można zmienić. Każda próba modyfikacji tych równań powoduje pogorszenie ich własności (tak naprawdę przestają wtedy być spójne). Gluony są obiektami działającymi zgodnie z równaniami opisującymi gluony. Byty *są* bitami.

Dość już jednak tych nazbyt swobodnych dywagacji! Matematyka teoretyczna zawiera mnóstwo pięknych idei. Źródłem owej szczególnej muzyki obecnej w fizyce jest harmonia między pięknymi ideami i rzeczywistością. Czas już na odrobinę rzeczywistości.

## Kwarki: wersja beta

Do początku lat sześćdziesiątych XX wieku fizycy doświadczalni odkryli dziesiątki hadronów o różnych masach, czasach życia i właściwej im rotacji (spinie). Uniesienie wywołane tymi odkryciami szybko przerodziło się w ból głowy, ponieważ nagromadzenie ciekawych faktów w obliczu braku jakiegokolwiek głębszego ich zrozumienia zaczęło wzbudzać coraz większe zakłopotanie. W 1955 roku w przemówieniu wygłoszonym z okazji przyjęcia Nagrody Nobla Willis Lamb tak zażartował:

> Gdy po raz pierwszy wręczano Nagrodę Nobla w 1901 roku, fizycy wiedzieli co nieco tylko o dwóch obiektach, które obecnie nazywamy „cząstkami elementarnymi”: znali elektrony i protony. Po roku 1930 doszło do zalewu innych cząstek „elementarnych”: neutron, neutrino, mezon *μ*, mezon *π* i cięższe mezony oraz różnorodne hiperony. Słyszałem, że krąży opinia, iż odkrywca nowej cząstki elementarnej miał zwykle murowaną Nagrodę Nobla, ale teraz odkrycie takie powinno się karać grzywną w wysokości 10 tysięcy dolarów.

W tej sytuacji Murray Gell-Mann i George Zweig dokonali olbrzymiego postępu w tworzeniu teorii oddziaływania silnego, przedstawiając model kwarkowy. Pokazali oni, że prawidłowości dotyczące mas, czasów życia i spinów hadronów zaczynają do siebie pasować, jeżeli wyobrazimy sobie, iż hadrony składają się z kilku bardziej podstawowych rodzajów obiektów, które Gell-Mann nazwał kwarkami. W ten sposób można było wytłumaczyć dziesiątki hadronów, przynajmniej ogólnie, jako różne zestawienia kwarków występujących jedynie w trzech odmianach, zwanych *zapachami*: kwarka górnego – oznaczanego symbolem *u* (od ang. *up*), dolnego – *d* (od ang. *down*) i dziwnego – *s* (od ang. *strange*)[12].

W jaki sposób można skonstruować dziesiątki hadronów z kilku zaledwie zapachów kwarków? Jak wyglądają te proste reguły rządzące skomplikowanymi prawidłowościami?

Pierwsze reguły, jakie zaproponowano, zostały sformułowane tak, by pasowały do obserwacji, i dlatego są nieco dziwaczne. Zdefiniowały one tak zwany model kwarkowy. Zgodnie z tym modelem istnieją jedynie dwa podstawowe schematy budowy hadronów. *Mezony* powstają z połączenia kwarka i antykwarka. *Bariony* są natomiast połączeniem trzech kwarków. (Istnieją również antybariony powstałe z połączenia trzech antykwarków). Mamy zatem jedynie kilka możliwości połączenia ze sobą kwarków i antykwarków o różnych zapachach, tak by tworzyły mezony: możemy połączyć kwark *u* z anty-*d* (oznaczanym symbolem *d*–) albo

*d* z *s*– i tak dalej. Podobnie w przypadku barionów jest tylko kilka możliwych kombinacji.

Zgodnie z modelem kwarkowym wielka różnorodność hadronów jest wynikiem nie tyle tworzących je części składowych, ile sposobu, w jaki zostały one ze sobą połączone. W szczególności dany zbiór kwarków można rozmieścić na różnych orbitach przestrzennych i ułożyć w różny sposób ich spiny, mniej więcej tak samo jak z par i trójek gwiazd można utworzyć różne konfiguracje za sprawą grawitacji.

Istnieje jednak kluczowa różnica między submikroskopowymi „układami planetarnymi" kwarków a ich makroskopowymi odpowiednikami. Podczas gdy makroskopowe układy planetarne, którymi rządzą prawa mechaniki klasycznej, mogą występować we wszelkich rozmiarach i kształtach, ich mikroskopowe wersje nie mają już takiej swobody. W przypadku mikroskopowych układów cząstek, którymi rządzą prawa mechaniki kwantowej, mamy do czynienia z ograniczeniami dotyczącymi dozwolonych orbit i sposobów ułożenia spinów[13]. Mówimy, że układ może się znajdować w różnych *stanach* kwantowych. Każda z dozwolonych konfiguracji orbit i spinów – każdy stan – charakteryzuje się pewną określoną energią całkowitą.

(Wyznanie i zapowiedź: pozwalam sobie w tym miejscu na odrobinę nieścisłości, nie chcę bowiem wprowadzać od razu zbyt wielu skomplikowanych pojęć. W świetle współczesnej mechaniki kwantowej prawidłowy sposób opisu stanu danej cząstki polega na przedstawieniu jej funkcji falowej mówiącej o prawdopodobieństwie znalezienia cząstki w różnych miejscach, a nie na określeniu orbity, na której się ona znajduje. Powiemy o tym więcej w rozdziale dziewiątym. Model wykorzystujący orbity jest pozostałością po tak zwanej starej mechanice kwantowej. Łatwo go sobie wyobrazić, ale nie można go wykorzystać do prowadzenia dokładnych badań).

Posługiwanie się układami kwarków do zrozumienia hadronów bardzo przypomina sposób, w jaki za pomocą elektronów wyjaśniamy budowę atomów. W atomie elektrony mogą zajmować

orbity o różnych kształtach, mogą też ustawiać spiny w różnych kierunkach. Dzięki temu atom może znajdować się w wielu różnorodnych stanach o różnych energiach. Badaniem tych możliwych stanów zajmuje się poważna dziedzina wiedzy zwana spektroskopią atomową. Dzięki niej możemy odkryć, z czego są zbudowane odległe gwiazdy, projektować lasery i rozwiązywać wiele innych istotnych kwestii. Ponieważ spektroskopia atomowa jest tak przydatna dla zrozumienia modelu kwarkowego i niezwykle ważna jako gałąź nauki, poświęćmy chwilę na jej omówienie.

Gorący gaz, na przykład taki jak ten, który znajduje się wewnątrz płomienia lub w atmosferze gwiazdy, zawiera atomy w różnych stanach. Nawet w atomach o takich samych jądrach i takiej samej liczbie elektronów elektrony mogą znajdować się na różnych orbitach lub mieć różne ułożenie spinów. Takie stany różnią się energią. Atomy w stanach o wysokiej energii mogą przeskoczyć do stanów o niższej energii, emitując przy tym światło. Ponieważ całkowita energia musi być zachowana, energia wyemitowanego fotonu, o której mówi barwa wysłanego światła, odpowiada różnicy energii między stanem początkowym i końcowym atomu. Każdy rodzaj atomów emituje światło z charakterystycznej dla siebie palety barw. Atomy wodoru wysyłają fale świetlne z jednego zestawu kolorów, atomy helu z zupełnie innego zestawu i tak dalej. Fizycy i chemicy nazywają tę paletę *widmem* atomu. Widmo jest swoistym podpisem atomu, którym można się posłużyć do wykrycia danego pierwiastka. Po przepuszczeniu światła przez pryzmat różne jego barwy ulegają rozdzieleniu i powstałe widmo bardzo przypomina kod paskowy.

Widma obserwowane w docierającym do nas świetle gwiazd pasują do widm uzyskiwanych ze światła płomieni palących się na Ziemi i właśnie dlatego możemy mieć pewność, że odległe gwiazdy składają się z takich samych substancji jak te, które znajdujemy na naszej planecie. Ponieważ światło odległych gwiazd potrzebuje czasami nawet miliardów lat, żeby do nas dotrzeć, możemy również sprawdzić, czy działające obecnie prawa fizyki są takie same jak prawa obowiązujące dawno temu. Jak dotąd dowody przemawiają za tym, że tak właśnie jest. (Mamy jednak przekonujące przesłanki, by przypuszczać, iż w *bardzo* młodym Wszechświecie, którego nie

możemy bezpośrednio obserwować, przynajmniej nie w zwyczajnym świetle, obowiązywały z gruntu odmienne prawa. Pomówimy o tym później).

Widma atomów zawierają wiele szczegółów pomocnych w konstruowaniu modeli ich wewnętrznej struktury. Model jest poprawny, jeżeli przewiduje stany, których różnice energetyczne pasują do wzorca barw obserwowanego w danym widmie. Znaczna część współczesnej chemii przybiera postać dialogu. Natura mówi językiem widm; chemicy odpowiadają, tworząc modele.

Nie zapominając o tym wszystkim, powróćmy do kwarkowego modelu hadronów. W tym przypadku mają zastosowanie te same idee, z jedną wszakże istotną zmianą. W atomach różnica w energiach dowolnych dwóch stanów elektronów jest względnie mała i dlatego wpływ tej energii na całkowitą masę atomu jest nieistotny. Główną ideą modelu kwarkowego jest to, że w przypadku kwarkowych „atomów" (to znaczy hadronów) różnice w energiach poszczególnych stanów są tak wielkie, iż wywierają istotny wpływ na masę. Spójrzmy na to z innej strony: wykorzystując drugie prawo Einsteina $m = E/c^2$, możemy powiedzieć, że hadrony o różnych masach są układami kwarków o różnych ułożeniach orbit – różnych stanach kwantowych – odpowiadających różnym energiom. Innymi słowy, widma atomów możemy *zobaczyć*, widma hadronów należy natomiast *zważyć*. Przekonujemy się zatem, że cząstki, które wydawały się zupełnie ze sobą niespokrewnione, teraz odpowiadają jedynie różnym wzorcom ruchu wewnątrz danego „atomu" składającego się z kwarków. Wykorzystując tę ideę, Gell-Mann i Zweig pokazali, że różnorodność zaobserwowanych hadronów można interpretować jako różne stany kilku podstawowych kwarkowych „atomów".

Jak dotąd, wszystko szło jak po maśle. Z wyjątkiem poprawki wynikającej z drugiego prawa Einsteina kwarkowy model hadronów wygląda jak powtórka chemii. Diabeł tkwi jednak w szczegółach i jedynie ktoś, kto przymyka oko na pewną prawdziwie piekielną złośliwość, może widzieć w modelu kwarkowym rzeczywistość.

Najbardziej złośliwym założeniem jest to, o czym już wspomnieliśmy, że dozwolone są jedynie dwa schematy cząstek: mezony (kwark-antykwark) i bariony (trzy kwarki). Wynika z tego w szczególności, że kwarki nie istnieją jako oddzielne cząstki! Z jakiegoś powodu musieliśmy przyjąć, że najprostszy schemat budowy cząstki jest niemożliwy. Nie jedynie nieefektywny czy nietrwały, ale właśnie niemożliwy. Nikt nie chciał w to oczywiście uwierzyć, fizycy więc zawzięcie rozbijali protony, próbując wykryć cząstki, które można by zidentyfikować jako pojedyncze kwarki. Bardzo uważnie przeglądali wszystkie powstające w tych zderzeniach produkty. Nie ma cienia wątpliwości, że na głowy ich odkrywców niczym orzeźwiający deszczyk spłynęłyby Nagrody Nobla i wieczna chwała. Niestety, ten święty Graal okazał się nieuchwytny. Nigdy nie udało się zaobserwować cząstki, która miałaby własności pojedynczego kwarka. W końcu ową niemożność wykrycia pojedynczych kwarków, tak jak kiedyś niemożność skonstruowania perpetuum mobile, podniesiono do rangi zasady: Zasady Uwięzienia. Samo nazwanie jej zasadą wcale jednak nie sprawiło, że stała się mniej zwariowana.

Kolejny dziwny problem pojawił się, gdy fizycy, wykorzystując kwarki, próbowali stworzyć pełny model wewnętrznej struktury mezonów i barionów, tak aby możliwe było dokładne wyjaśnienie ich mas. Na podstawie najlepszych spośród skonstruowanych modeli można było dojść do wniosku, że gdy kwarki (lub antykwarki) znajdują się blisko siebie, praktycznie nie zauważają swojej obecności. Tak nikłe oddziaływanie między kwarkami trudno było pogodzić z odkryciem, że każda próba wyizolowania kwarka – albo dwóch – kończy się niepowodzeniem. Skoro kwarki nie zwracają wzajemnie na siebie uwagi, gdy są blisko, to dlaczego nie pozwalają się do końca rozdzielić, gdy są od siebie oddalone?

Oddziaływanie podstawowe, którego siła *rośnie* z odległością, byłoby przypadkiem niespotykanym i z jego istnienia wynikałoby pewne kłopotliwe pytanie. Jeśli siły działające między kwarkami mogą rosnąć z odległością, to dlaczego astrologia jest w błędzie? W końcu inne planety zawierają mnóstwo kwarków. Możliwe, że mogą one wywierać duży wpływ… Cóż, możliwe, ale przez całe

stulecia uczeni i inżynierowie odnosili wielkie sukcesy, przewidując wyniki precyzyjnych doświadczeń, budując mosty i projektując układy scalone, a pomijając przy tym jakikolwiek wpływ odległych obiektów. Astrologia nie powinna tak łatwo dawać za wygraną.

Ponieważ dobra teoria naukowa musi wyjaśnić, dlaczego astrologia tak źle sobie radzi, dobrze by było, aby nie uwzględniała oddziaływań, których siła rośnie z odległością. Stare porzekadło „rozstanie wzmacnia uczucia" może, albo i nie, sprawdzać się w sprawach sercowych, ale nie ulega wątpliwości, że w przypadku cząstek takie zachowanie jest dziwaczne.

W procesie pisania oprogramowania bardzo często odważnym pierwszym użytkownikom dostarcza się wersję beta programu. Taka testowa wersja działa, mniej więcej, ale nie ma na nią żadnej gwarancji. Z pewnością pojawią się jakieś błędy i braki. Nawet działające fragmenty programu nie będą tak dobrze opracowane jak w wersji ostatecznej.

Pierwszy model kwarkowy był taką testową wersją beta teorii fizycznej. Posługiwał się osobliwymi regułami. Nie udzielał odpowiedzi na pewne podstawowe pytania – takie jak: dlaczego (albo czy) nie można będzie nigdy uzyskać pojedynczych kwarków. A najgorsze z tego wszystkiego było to, że model kwarkowy był niejasny. Nie towarzyszyły mu precyzyjne równania na siły działające między kwarkami. Pod tym względem przypominał on powstające przed Newtonem modele Układu Słonecznego albo konstruowane przed Schrödingerem (uwaga dla znawców tematu: nawet przed Bohrem) modele atomów. Wielu fizyków, w tym nawet sam Gell-Mann, uważało, że kwarki mogą się ostatecznie okazać użyteczną fikcją, niczym epicykle w dawnej astronomii albo orbitale starej teorii kwantowej. Wyglądało na to, że okażą się przydatnym tymczasowym rozwiązaniem w matematycznym opisie przyrody, którego nie należy brać zbyt dosłownie za element rzeczywistości.

## Kwarki 1.0: obserwacje przez nanomikroskop ultrastroboskopowy

Na początku lat siedemdziesiątych XX wieku, gdy Jerome Friedman, Henry Kendall, Richard Taylor i ich współpracownicy zbadali w nowy sposób protony, wykorzystując w tym celu Akcelerator Liniowy Uniwersytetu Stanforda (SLAC), teoretyczne osobliwości kwarków przerodziły się w pełnokrwiste paradoksy.

Uczeni ci nie rozbijali o siebie protonów w celu przeanalizowania produktów zderzeń, ale wykonywali fotografie ich wnętrza. Nie chciałbym, żeby zabrzmiało to zbyt prosto, ponieważ nie było to łatwe. Aby zajrzeć do wnętrza protonów, należy wykorzystać „światło" o bardzo małej długości fali. W przeciwnym wypadku obserwacje takie można by porównać do próby wykrycia ryb na podstawie wpływu, jaki wywierają one na długie fale oceanu. Fotony odpowiednie do takiego zadania nie są cząstkami zwyczajnego światła. Ich długość fali jest mniejsza od długości fali światła ultrafioletowego, a nawet od promieni rentgenowskich. Nanomikroskop pozwalający na badanie struktur miliardy razy mniejszych od tego, co można zobaczyć w zwyczajnym mikroskopie optycznym, wymaga zastosowania *ekstremalnie* krótkich promieni γ.

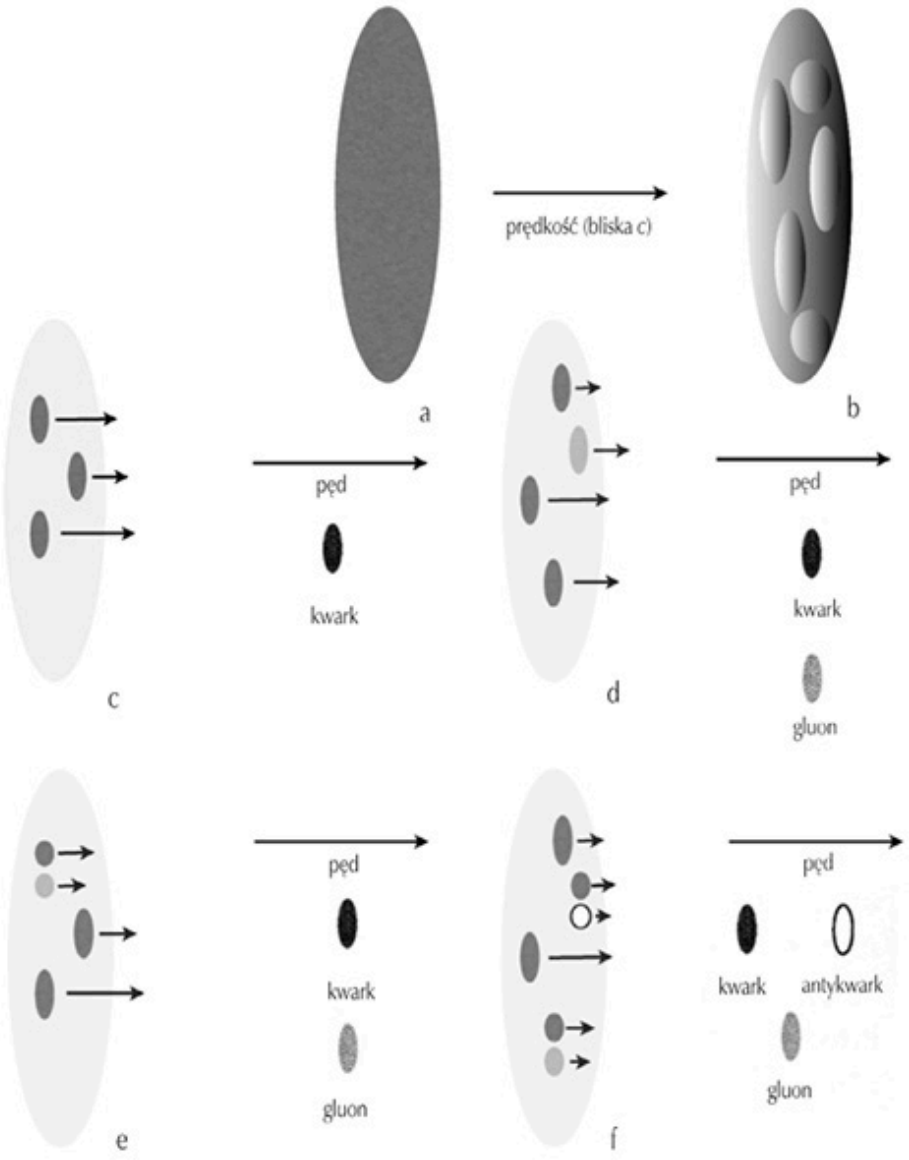
Druga kwestia to fakt, że wewnątrz protonów sytuacja zmienia się bardzo dynamicznie, aby więc uniknąć nieostrych zdjęć, musimy dysponować odpowiednią rozdzielczością czasową. Innymi słowy, nasze fotony muszą się charakteryzować również niezwykle krótkim czasem życia. Potrzebujemy błysków albo iskier, a nie długich ekspozycji. Mówimy tu o „rozbłyskach" trwających najwyżej $10^{-24}$ sekundy. Potrzebne nam fotony mają tak krótki czas życia, że ich samych nie można zaobserwować. Dlatego też nazywa się je fotonami *wirtualnymi*. Ultrastroboskop pozwalający dostrzec zjawiska trwające jedną bilionową jednej bilionowej sekundy (tak naprawdę, jeszcze krócej) musi wykorzystywać niesamowicie wirtualne fotony. Z tego powodu owego „zdjęcia" nie można wykonać za pomocą „światła", którym na co dzień wszystko oświetlamy! Musimy być sprytniejsi i działać w sposób pośredni.

W SLAC zatem uczeni strzelali w protony elektronami i obserwowali elektrony pojawiające się po takim zderzeniu. Elektrony po zderzeniu mają mniejszą niż na początku energię i pęd. Ponieważ całkowita

energia i całkowity pęd muszą być zachowane, utraconą przez elektron energię i pęd musiał unieść ze sobą wirtualny foton i przekazać następnie protonowi. Bardzo często prowadzi to do niezwykle skomplikowanego rozbicia protonu, o czym już mówiliśmy. Genialny pomysł – nowe podejście, dzięki któremu Friedman, Kendall i Taylor zdobyli Nagrodę Nobla – polegał na zignorowaniu wszystkich tych komplikacji i skupieniu uwagi jedynie na elektronie. Innymi słowy, dajemy się ponieść przepływowi (energii i pędu).

Tym sposobem, wyjaśniając przepływ energii i pędu, możemy dojść do tego, jakiego rodzaju wirtualny foton brał udział w procesie w każdym z kolei zdarzeniu, mimo że danego fotonu nie możemy bezpośrednio „zobaczyć". Energia i pęd wirtualnego fotonu są równe energii i pędowi *utraconym* przez elektron. Mierząc prawdopodobieństwo tego, że różne rodzaje wirtualnych fotonów, o różnych energiach i pędach (co odpowiada różnym czasom życia i długościom fali), „na coś natrafiły" i zostały zaabsorbowane, możemy złożyć w całość obraz wnętrza protonu. Sposób ten przypomina pod względem idei metodę tworzenia obrazu wnętrza ludzkiego ciała na podstawie pomiaru stopnia absorpcji promieni rentgenowskich – chociaż w przypadku SLAC szczegóły są zdecydowanie bardziej skomplikowane. Wystarczy, jeśli powiemy, że w grę wchodzą tu bardzo wymyślne techniki przetwarzania obrazu.

Oczywiście wnętrze protonu nie przypomina niczego, co kiedykolwiek widzieliśmy lub moglibyśmy zobaczyć. Naszych oczu nie zaprojektowano (wróć, nie wyewoluowały) tak, byśmy mogli zauważyć tak małe odległości i odstępy czasu, zatem każda wizualizacja świata ultrastrobonanomikroskopowego musi być mieszanką karykatury, przenośni i oszustwa. Mając na uwadze to ostrzeżenie, spójrzcie na ilustracje przedstawione na rysunku 6.1. Omówimy teraz różne ich aspekty.




Rysunek 6.1. Ilustracje przedstawiające wnętrze protonu. a) Zgodnie z teorią względności proton poruszający się z prędkością bliską prędkości światła zdaje się spłaszczony w kierunku ruchu. b) Przed wykonaniem zdjęć wnętrza protonu spodziewaliśmy się, na podstawie naszej najlepszej ówczesnej wiedzy, że tak może ono właśnie wyglądać. Rozumowanie, które doprowadziło do powstania tego (błędnego) obrazu, wyjaśniono w tekście rozdziału. c–d) Dwa rzeczywiste zdjęcia wnętrza protonu. Ponieważ w tym przypadku kwantowomechaniczna niepewność wywiera dominujący wpływ, każde zdjęcie wygląda inaczej! W środku protonu widać kwarki i gluony, również poruszające się z prędkością bliską prędkości światła. Ich pędy są składnikami całkowitego pędu protonu, a rozmiary strzałek obrazują przypadający na poszczególne cząstki udział. e–f). Jeżeli przeprowadzimy

obserwacje z większą rozdzielczością, naszym oczom ukaże się więcej szczegółów. Może się na przykład okazać, że to, co wyglądało jak kwark, jest kwarkiem i gluonem, albo że gluon jest kwarkiem i antykwarkiem.

Przygotowując te ilustracje, wykorzystałem sztuczkę, której nauczyłem się od Richarda Feynmana. Jak wcześniej zauważyłem, cząstki we wnętrzu protonu poruszają się niezwykle szybko. By nieco je zwolnić, wyobrażamy sobie, że proton mija nas z prędkością bliską prędkości światła. (W rozdziale dziewiątym powiemy, jak wygląda proton, jeżeli nie zastosuje się sztuczki Feynmana). Dla obserwatora z zewnątrz proton będzie wtedy wyglądał jak naleśnik – będzie spłaszczony w kierunku ruchu. To efekt słynnego skrócenia Lorentza–Fitzgeralda wynikającego ze szczególnej teorii względności. Dla nas większe znaczenie ma inny słynny efekt relatywistyczny: dylatacja czasu. Polega on na tym, że we wnętrzu szybko poruszających się obiektów czas zdaje się płynąć wolniej. Dzięki temu w środku naszych protonów wszystko wydaje się niemal zamrożone w czasie. (Oczywiście wszystkie składniki we wnętrzu protonu poruszają się tym samym ruchem co cały proton). Skrócenie Lorentza–Fitzgeralda i dylatację czasu wyjaśniono już w setkach książek popularnonaukowych dotyczących teorii względności, zamiast więc rozpisywać się w tym miejscu na ich temat, po prostu te efekty wykorzystam.

Koniecznie należy podkreślić, że mechanika kwantowa jest absolutnie niezbędna do opisu nawet najbardziej podstawowych obserwacji wnętrza protonu. W szczególności od razu rzuca się w oczy nieokreśloność, z której mechanika kwantowa słynie i która była dla Einsteina źródłem tak wielkiej męczarni. Jeżeli w takich samych warunkach[14] zrobimy kilka zdjęć protonu, ujrzymy różne wyniki. Czy nam się to podoba, czy nie, fakty te są jednoznaczne i nieuniknione. W najlepszym wypadku możemy mieć nadzieję, że uda nam się przewidzieć względne prawdopodobieństwa uzyskania poszczególnych wyników.

Ta obfitość współistniejących możliwości w zjawiskach i w opisującej je teorii kwantowej stawia wyzwanie dla tradycyjnej logiki. Sukces teorii kwantowej w opisywaniu rzeczywistości

przewyższa i w pewnym sensie obala tradycyjną logikę, opierającą się na założeniu, że pewne rzeczy są „prawdziwe”, a ich zaprzeczenia są „fałszywe”. W tym przypadku mamy jednak do czynienia z twórczą destrukcją umożliwiającą zbudowanie nowych konstrukcji teoretycznych. Na przykład możemy pogodzić ze sobą dwie na pozór sprzeczne idee dotyczące istoty protonów. Z jednej strony wnętrze protonu jest miejscem bardzo dynamicznym, w którym wszystko się zmienia i porusza. Z drugiej wszystkie protony zawsze i wszędzie zachowują się dokładnie tak samo. (To znaczy, z każdym protonem związane są takie same prawdopodobieństwa!). Skoro jeden proton w danej chwili nie jest taki sam jak w innym momencie, jak to możliwe, że wszystkie protony są identyczne?!

Już wyjaśniam. Każda pojedyncza możliwość *A* opisująca wnętrze protonu ewoluuje z czasem w nową, inną możliwość, powiedzmy *B*. W tym samym czasie zaś jakaś inna możliwość *C* ewoluuje w *A*. Dlatego możliwość *A* wciąż jest obecna; nowa kopia zastępuje starą. Mówiąc ogólniej, chociaż każda pojedyncza możliwość z upływem czasu się zmienia, pełny rozkład możliwości pozostaje taki sam. Przypomina to płynącą spokojnie rzekę, która zawsze wygląda tak samo, mimo że każda kropla tworzącej ją wody jest w nieustannym ruchu. W rozdziale dziewiątym wejdziemy głębiej do tej rzeki.

## Partony

Zdjęcia zrobione przez Friedmana i jego współpracowników okazały się jednocześnie objawieniem i zagadką. Na zdjęciach tych można było dostrzec wewnątrz protonu niewielkie elementy, małe subcząstki. Feynman, który był odpowiedzialny za przeprowadzenie znacznej części prac związanych z przetwarzaniem obrazu, nazwał te wewnętrzne składniki „partonami” (określenie to utworzył od angielskiego słowa *part* oznaczającego „część”, zatem termin „parton” można rozumieć jako „cząstka będąca częścią”).

Określenie to doprowadzało Murraya Gell-Manna do szewskiej pasji. Sam się o tym przekonałem, gdy po raz pierwszy spotkałem

się z Gell-Mannem. Zapytał mnie, nad czym teraz pracuję, a ja popełniłem błąd, mówiąc: „Próbuję poprawić model obejmujący partony”. Mówi się, że wyznanie winy jest balsamem dla duszy, pozwólcie więc, iż wyznam w tym miejscu, że moja wzmianka o partonach nie była całkowicie wynikiem naiwności i nieświadomości. Chciałem zobaczyć, jak Gell-Mann zareaguje na dźwięk terminu ukutego przez jego rywala. Jak napisał Izmael po pierwszym spotkaniu z kapitanem Ahabem, rzeczywistość okazała się straszniejsza, niż można się było spodziewać.

Gell-Mann spojrzał na mnie z lekkim zdziwieniem.

– Partony? – Tu nastąpiła wymowna cisza, a jego twarz przybrała wyraz głębokiego skupienia. – Partony?? A cóż to takiego?

Znowu zamilkł i sprawiał wrażenie pogrążonego w myślach, aż w końcu jego twarz się rozjaśniła.

– Ach, masz zapewne na myśli te *partoły*, o których tyle mówi Dick Feynman! Owe cząstki, które nie podlegają prawom kwantowej teorii pola. Niczego takiego nie ma. Istnieją jedynie kwarki. Nie należy pozwalać, by Feynman zanieczyszczał język naukowy swoimi żartami.

W końcu z wymalowanym na twarzy zdziwieniem powiedział mentorskim tonem:

– A może miałeś na myśli kwarki?

Rzeczywiście okazało się, że niektóre z cząstek zaobserwowanych przez Friedmana i jego współpracowników to kwarki. Miały one zarówno ów dziwny ułamkowy ładunek elektryczny, jak i dokładnie taką ilość spinu, jaką powinny mieć kwarki. Protony natomiast zawierały w swoim wnętrzu również inne elementy, które nie wyglądały jak kwarki. Później ustalono, że są to gluony – nośniki ładunku koloru. Ostatecznie więc obaj, zarówno Gell-Mann, jak i Feynman, mieli do pewnego stopnia rację: we wnętrzu protonu są kwarki, ale oprócz tego kłębią się jeszcze inne cząstki.

## Zbyt proste

Na mojej Alma Mater, na Uniwersytecie Chicagowskim, można kupić bluzę z napisem:

To sprawdza się w *praktyce*, ale co z *teorią*?

Zarówno kwarki Gell-Manna, jak i partony Feynmana miały tę denerwującą cechę, że sprawdzały się doskonale w praktyce, ale już nie w teorii.

Mówiliśmy już o tym, że model kwarkowy pomógł w uporządkowaniu hadronowego zoo, ale ceną za to była konieczność używania dziwacznych zasad. Model partonowy posługiwał się innymi osobliwymi zasadami, tym razem stosowanymi do interpretacji owych zdjęć wnętrza protonu. Zasady te są bardzo proste: na potrzebę obliczeń należy przyjąć, że owe składniki wewnątrz protonu – kwarki, partony, jakkolwiek byśmy je nazwali – *nie mają* żadnej wewnętrznej struktury[15] i wzajemnie ze sobą *nie* oddziałują. Oczywiście w rzeczywistości oddziałują; inaczej protony po prostu by się rozpadły. Idea modelu partonowego zasadza się jednak na tym, że pomijając oddziaływania, można uzyskać dobry przybliżony opis tego, co dzieje się w bardzo krótkim czasie na niezwykle małych odległościach. A dzięki dostępnemu w SLAC ultrastroboskopowemu nanomikroskopowi można śledzić zachowanie cząstek w niezwykle krótkim czasie na bardzo małych odległościach. Model partonowy mówi więc, że dzięki temu urządzeniu uzyskamy wyraźny obraz wnętrza protonu – i tak rzeczywiście jest. A także, że powinniśmy zobaczyć bardziej podstawowe elementy składowe, jeżeli takowe istnieją – i tak naprawdę jest.

Wszystko to brzmi bardzo rozsądnie, jest niemal intuicyjnie oczywiste. W bardzo krótkim czasie w niezwykle małej objętości nie może się przecież zbyt wiele wydarzyć. Cóż więc jest w tym takiego szalonego?

Problem w tym, że gdy osiąga się naprawdę małe odległości i krótkie czasy, do głosu zaczyna dochodzić mechanika kwantowa. Gdy weźmiemy ją pod uwagę, wtedy to „rozsądne, niemal intuicyjnie

oczywiste” oczekiwanie, że w krótkim czasie w niewielkiej objętości za wiele się nie wydarzy, staje się dużą naiwnością.

Jednym ze sposobów na zrozumienie tego, bez zbytniego zagłębiania się w teorię, jest rozważenie zasad nieoznaczoności Heisenberga. Zgodnie z oryginalną zasadą nieoznaczoności dokładne ustalenie położenia wymaga pogodzenia się z dużą niepewnością odnośnie do pędu. Teoria względności wymaga dodatkowej zasady nieoznaczoności, w której przestrzeń odpowiada czasowi, a pęd – energii. Ta dodatkowa zasada mówi, że dokładne ustalenie czasu wymaga pogodzenia się z dużą niepewnością odnośnie do energii. Po ich połączeniu odkryjemy, że jeżeli chcemy zrobić zdjęcia utrwalające z dużą rozdzielczością bardzo krótką chwilę, musimy przyjąć do wiadomości, że niewiele dowiemy się na temat pędu i energii.

Jak na ironię główna technika stosowana w doświadczeniach Friedmana, Kendalla i Taylora opierała się, jak już wspomnieliśmy, właśnie na pomiarach energii i pędu. Nie ma w tym jednak żadnej sprzeczności. Przeciwnie, technika ta jest świetnym przykładem sprytnego wykorzystania zasady nieoznaczoności Heisenberga do uzyskania pewności. Sedno tego pomysłu polega na tym, że w celu uzyskania ostrego obrazu wycinka czasoprzestrzeni można – i należy – połączyć ze sobą wyniki *wielu* zderzeń protonu z cząstkami o różnych energiach i pędach. Wtedy podczas przetwarzania obrazu dokonuje się odwrócenia zasady nieoznaczoności. Starannie dobrane próbki wyników uzyskanych przy różnych energiach i pędach zestawia się ze sobą w taki sposób, aby uzyskać dokładne położenia i czasy. (Uwaga dla ekspertów: oblicza się transformaty Fouriera).

Ponieważ uzyskanie ostrego obrazu wymaga uwzględnienia wyników z szerokiego zakresu energii i pędów, badania muszą objąć również duże wartości tych wielkości. Przy dużych wartościach energii i pędu mamy dostęp do wielu „rzeczy” – na przykład wielu cząstek i antycząstek. Te *wirtualne* cząstki pojawiają się i znikają bardzo szybko, nie przemierzają więc zbyt dużych odległości. Pamiętajmy, że mamy z nimi do czynienia tylko w czasie wykonywania utrwalających bardzo krótkie czasy zdjęć o dużej

rozdzielczości. Nie zobaczymy ich, w żadnym zwyczajnym sensie tego słowa, jeśli nie wytworzymy energii i pędu potrzebnego do ich powstania. Nawet wtedy nie będziemy mogli zobaczyć oryginalnych, niezaburzonych cząstek wirtualnych (takich, które spontanicznie pojawiają się i znikają), ale jedynie cząstki rzeczywiste, które w czasie przetwarzania obrazu możemy wykorzystać do odtworzenia owych cząstek wirtualnych.

Wirusy mogą się rozmnażać jedynie z pomocą bardziej złożonych organizmów. Cząstki wirtualne są jeszcze mniej samodzielne, ponieważ potrzebują pomocy z zewnątrz, żeby w ogóle *zaistnieć*. Niemniej pojawiają się w równaniach mechaniki kwantowej i jak wynika z tych równań, mają one wpływ na zachowanie cząstek, które możemy zobaczyć.

Uzasadnione wydawało się zatem założenie, że cząstki wirtualne powinny wywierać duży wpływ w sytuacjach, gdy bada się cząstki podlegające oddziaływaniu silnemu, takie jak składniki protonu. Eksperci od mechaniki kwantowej spodziewali się, że jeżeli będziemy oglądać coraz mniejsze wycinki protonu w coraz krótszych czasach, zobaczymy coraz więcej cząstek wirtualnych i złożoności. Dlatego zastosowane przez Friedmana, Kendalla i Taylora podejście nie wydawało się zbyt obiecujące. Spodziewano się, że zdjęcia wykonane nanomikroskopem ultrastroboskopowym będą bardzo nieostre[16].

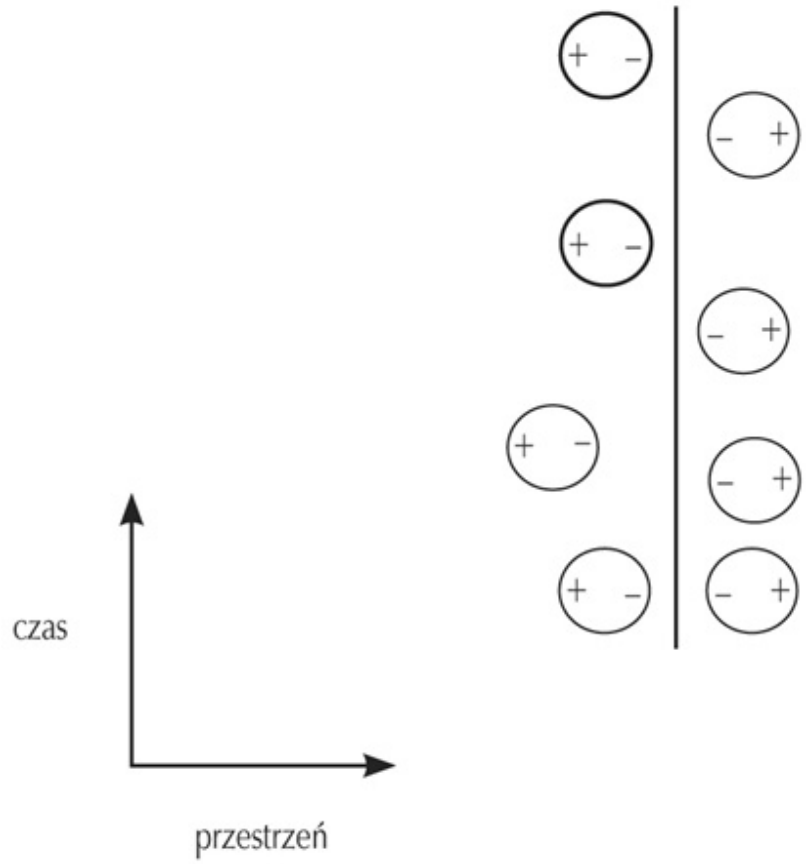
Okazało się jednak, że nie były one wcale rozmyte. Widać na nich było owe denerwujące partony. Einstein udzielił nam kiedyś słynnej rady: „Wszystko powinno być tak proste, jak to tylko możliwe, ale nie prostsze”. Partony były zbyt proste.

## Swoboda asymptotyczna (ładunek bez ładunku)

Wyobraźmy sobie, że jesteśmy cząstkami wirtualnymi. Pojawiamy się nagle znikąd i musimy podjąć decyzję, co chcemy zrobić w zdecydowanie za krótkim czasie naszego życia. (To akurat nietrudno nam sobie wyobrazić). Rozglądamy się. Załóżmy,

że w pobliżu znajduje się jakaś cząstka o ładunku dodatnim. Jeżeli my mamy akurat ładunek ujemny, cząstka ta wyda nam się niezwykle atrakcyjna i spróbujemy się do niej przytulić. Jeżeli zaś jesteśmy obdarzeni ładunkiem dodatnim, cząstka ta wyda nam się odrażająca albo w najlepszej sytuacji potraktujemy ją jako konkurencję oraz potencjalne zagrożenie i postaramy się od niej oddalić. (Z wyobrażeniem sobie tego też nie powinno być kłopotu).

Poszczególne cząstki wirtualne pojawiają się i znikają, ale ponieważ jest ich wiele, sprawiają, że to, co nazywamy pustą przestrzenią, okazuje się ośrodkiem bardzo dynamicznym. W wyniku aktywności cząstek wirtualnych (rzeczywisty) ładunek dodatni jest częściowo *ekranowany*. To znaczy, ładunek dodatni bywa zwykle otoczony obłokiem równoważących go ładunków ujemnych, dla których jest on atrakcyjny. Z dużej odległości nie odczuwamy pełnej jego siły, ponieważ jest ona częściowo równoważona przez ów ujemny obłok[17]. Innymi słowy, wypadkowy ładunek rośnie w miarę zbliżania się do cząstki i maleje, gdy się od niej oddalamy. Sytuację tę pokazano na rysunku 6.2.




Rysunek 6.2. Cząstki wirtualne ekranujące ładunek. Narysowana w środku linia świata przedstawia tkwiący nieruchomo w miejscu ładunek dodatni – pionowa linia odzwierciedla upływ czasu. Tę rzeczywistą cząstkę otaczają pary wirtualnych cząstek i antycząstek, które pojawiają się w przypadkowych momentach, na chwilę się rozdzielają, a potem znikają. Dodatni ładunek cząstki rzeczywistej przyciąga z każdej wirtualnej pary cząstki lub antycząstki o ładunku ujemnym, a odpycha te o ładunku dodatnim. Rzeczywista cząstka jest zatem otoczona przez obłok wirtualnych cząstek o ładunku ujemnym, które częściowo ekranują jej dodatni ładunek. Z daleka zobaczymy, że efektywny ładunek jest mniejszy, ponieważ chmura ujemnych cząstek wirtualnych częściowo znosi znajdujący się w jej środku ładunek dodatni.

Dokładnie *przeciwnego* zachowania oczekujemy od kwarków w modelu kwarkowym czy partonów w modelu partonowym. Spodziewamy się, że kwarki znajdujące się blisko siebie będą ze sobą oddziaływać dosyć słabo. Jeżeli jednak ich ładunek wypadkowy jest największy w ich bezpośrednim sąsiedztwie,

powinniśmy zaobserwować coś zupełnie odmiennego. Kwarki powinny w takim przypadku oddziaływać ze sobą najsilniej wtedy, gdy są blisko siebie, a słabiej – gdy są od siebie oddalone, z tego bowiem powodu ich ładunki ulegają ekranowaniu. Z kolei partony z bliska powinny wyglądać jak proste pojedyncze cząstki. Jeżeli jednak każdy parton otacza gruby obłok wirtualnych cząstek, zobaczymy jedynie te obłoki.

Bez wątpienia byłoby nam dużo łatwiej opisać kwarki, gdybyśmy mogli powołać się na jakieś zjawisko będące przeciwieństwem ekranowania – jakieś obłoki, które wzmacniają, zamiast osłabiać, znajdujący się w ich środku ładunek. W przypadku takiego *antyekranowania* moglibyśmy obserwować oddziaływania, które są słabe na małych odległościach, ale za sprawą owych obłoków rosną w siłę wraz z odległością. Ładunek elektryczny jest ekranowany, nie antyekranowany, a zatem musimy gdzie indziej poszukać odpowiedniego modelu. Oczywiście znajdziemy go; w przeciwnym razie nie prowadziłbym was tą ścieżką. Aby łatwiej było nam o tym mówić, nazwijmy tymczasowo tę hipotetyczną rzecz podlegającą antyekranowaniu „uadunkiem". (Przekonamy się, że pewien uogólniony rodzaj ładunku, ładunek koloru, zachowuje się jak uadunek).

Jeżeli obłok cząstek wirtualnych antyekranuje uadunek, to moc rzeczywistego, znajdującego się w środku tej chmury uadunku będzie rosła w miarę oddalania się od niego. Z małego uadunku można w ten sposób uzyskać na dużych odległościach potężne siły, ponieważ otaczające go wirtualne cząstki wzmacniają jego wpływ. Zatem gdyby kwarki miały uadunek zamiast (albo oprócz) ładunku elektrycznego, będąc blisko siebie, mogłyby ze sobą oddziaływać słabo, tak jak chce tego model kwarkowy, a bardzo silnie, gdy będą od siebie oddalone. Co więcej, można taki efekt uzyskać, nie legitymizując przy tym astrologii, co za moment wyjaśnię. W takim przypadku również partony nie muszą się skrywać w gęstych obłokach, ponieważ ich zwabiająca obłoki siła – wypadkowy uadunek – słabnie w bezpośrednim sąsiedztwie.

A co z owym nieograniczonym wzrostem siły wraz z odległością, który groził wskrzeszeniem astrologii? Wzrost ten jest efektem, który

obserwujemy w przypadku pojedynczej, wyizolowanej cząstki z uadunkiem. Tak wielki obłok ma jednak swą cenę. (Można by ukuć powiedzenie: z dużej chmury – duży koszt). Wytworzenie takiego zaburzenia jest kosztowne pod względem energetycznym i rozprzestrzenienie go na nieskończoną odległość wymagałoby nieskończonej energii. Ponieważ dostępna energia jest wielkością skończoną, Natura nie pozwoli nam na wytworzenie izolowanej cząstki z uadunkiem. Z drugiej strony *może* nam się udać stworzenie układu nauadowanych cząstek, których uadunki wzajemnie się znoszą – najprostszym przykładem takiego układu jest obdarzona uadunkiem cząstka i jej antycząstka. Cząstki wirtualne znajdujące się w dużej odległości zarówno od uadunku, jak i znoszącego go antyuadunku nie odczują żadnego wypadkowego oddziaływania i tym samym obłoki nie będą narastały bez końca. Wszystko to przestaje już powoli brzmieć jak uzasadnienie astrologii, a bardziej zaczyna przypominać wyjaśnienie diabolicznych zasad modelu kwarkowego! Za sprawą jednego sprytnego pomysłu możemy wyeliminować wpływ na dużych odległościach i jednocześnie uwięzić blisko siebie całe klasy cząstek.

Antyekranowanie to okropne słowo. Określenie fachowe stosowane przez fizyków – *swoboda asymptotyczna* – jest chyba niewiele lepsze[18]. Pomysł polega na tym, że w miarę jak odległość do kwarka maleje do zera, wypadkowy ładunek koloru skrywający się głęboko w swoim obłoku zbliża się coraz bardziej do zera, ale nigdy tej wartości nie osiąga. Zerowy ładunek koloru oznacza całkowitą swobodę – brak wywierania i odczuwania wpływu jakiegokolwiek oddziaływania. Taka całkowita swoboda jest więc osiągana, jak mawiają matematycy, asymptotycznie.

Jakkolwiek by ją zwać, swoboda asymptotyczna jest obiecującą ideą, pomocną w opisywaniu kwarków i ukazaniu partonów w odpowiednim świetle. Dobrze byłoby też mieć teorię obejmującą swobodę asymptotyczną, która byłaby jednocześnie zgodna z podstawowymi zasadami fizyki. Czy jednak teoria taka może istnieć?

Zasady mechaniki kwantowej i szczególnej teorii względności są tak ścisłe i potężne, że bardzo trudno jest skonstruować teorie łączące w sobie je obydwie. Nieliczne, którym to się udało, określa się jako relatywistyczne kwantowe teorie pola. Ponieważ znamy jedynie kilka podstawowych sposobów konstruowania relatywistycznych kwantowych teorii pola, możemy zbadać wszystkie możliwości i sprawdzić, czy któraś z nich prowadzi do swobody asymptotycznej.

Obliczenia, jakie należy w tym celu przeprowadzić, nie są proste, ale nie są też niemożliwe do wykonania[19]. W wyniku tych prac uzyskaliśmy coś, o czym marzy każdy uczony, choć rzadko komu zdarza się uzyskać taki wynik: jasną, jednoznaczną odpowiedź. Prawie we wszystkich relatywistycznych kwantowych teoriach pola występuje ekranowanie. To intuicyjne, „sensowne" zachowanie rzeczywiście jest prawie nieuniknione. Chociaż nie całkiem. Istnieje niewielka klasa teorii obejmujących swobodę asymptotyczną (antyekranowanie). W samym jądrze każdej z tych teorii pojawiają się uogólnione ładunki wprowadzone przez Yanga i Millsa. We wspomnianej niewielkiej klasie teorii uwzględniających swobodę asymptotyczną można znaleźć jedną, która, jak się wydaje na pierwszy rzut oka, opisuje rzeczywiste kwarki (i gluony). Teorię tę nazywa się chromodynamiką kwantową[20], w skrócie QCD, od ang. *quantum chromodynamics*.

Jak już wspomniałem, QCD wygląda niczym znacznie rozszerzona kwantowa wersja elektrodynamiki – elektrodynamika kwantowa, w skrócie QED, od ang. *quantum electrodynamics*. Zawiera olbrzymią ilość symetrii. Byśmy mogli choć trochę ją zrozumieć, musimy najpierw przygotować grunt, omawiając pojęcie symetrii. Następnie na tej podstawie skonstruujemy opis teorii, posługując się rysunkami i porównaniami.

Najtrudniejsze może się okazać wyobrażenie sobie, jaki związek mogą mieć wszystkie te abstrakcje i porównania z czymkolwiek rzeczywistym i konkretnym. W ramach rozgrzewki dla wyobraźni przyjrzyjmy się *fotografii* nieistniejących rzeczy. Przed państwem – na rycinie nr 1 kolorowej wkładki – kwark, antykwark i gluon.

# Kwarki i gluony 2.0: uwierzyć znaczy zobaczyć

Oczywiście w rzeczywistości zdjęcie nie wychodzi z aparatu z podpisami „kwark, antykwark, gluon” zamieszczonymi w odpowiednich miejscach. Wymaga paru objaśnień.

Na początek sporządźmy ewidencję obiektów widocznych na zdjęciu, używając normalnego języka. Te skomplikowanie wyglądające elementy są konturami magnesów oraz innych części akceleratora i detektora. Zauważmy wąską rurkę biegnącą przez ich środek. To rura wiązki, w której krążą elektrony i pozytony. Ilustracja przedstawia jedynie niewielki wycinek, kilka metrów bocznej części akceleratora LEP, skonstruowanego wewnątrz kołowego tunelu o obwodzie 27 kilometrów. (A tak przy okazji, w tym samym tunelu znajduje się teraz Wielki Zderzacz Hadronów – LHC, *Large Hadron Collider* – który wykorzystuje protony zamiast elektronów i pozytonów, pozwala również na uzyskanie wyższych energii. Więcej na temat LHC powiemy w dalszych rozdziałach). Krążące w przeciwnych kierunkach wiązki elektronów i pozytonów rozpędzano w akceleratorze LEP do olbrzymiej energii, tak że ich prędkość była tylko o jedną dziesięciomiliardową mniejsza od prędkości światła. Obie wiązki przecinały się w kilku punktach, w których dochodziło do zderzeń. Te specjalne punkty otoczono wielkimi detektorami, które rejestrowały rozbłyski i przechwytywały ciepło emanujące z cząstek pojawiających się w wyniku zderzenia. Widoczne na zdjęciu rozbiegające się linie są torami cząstek, a kropki na zewnątrz obrazują wychwycone ciepło.

Następnym krokiem jest przełożenie opisu tego, co widzimy, z języka mówiącego o wyglądzie zewnętrznym na język struktury wewnętrznej. Tłumaczenie to wymaga tak dużego skoku pojęciowego[21], że można by powiedzieć, iż należy się wykazać aktem wiary. Zanim wykonamy ten skok, umocnijmy więc wpierw swą wiarę.

Ojciec James Malley SJ nauczył mnie głębokiej i niezwykle przydatnej w badaniach naukowych zasady. (Ma ona również wiele

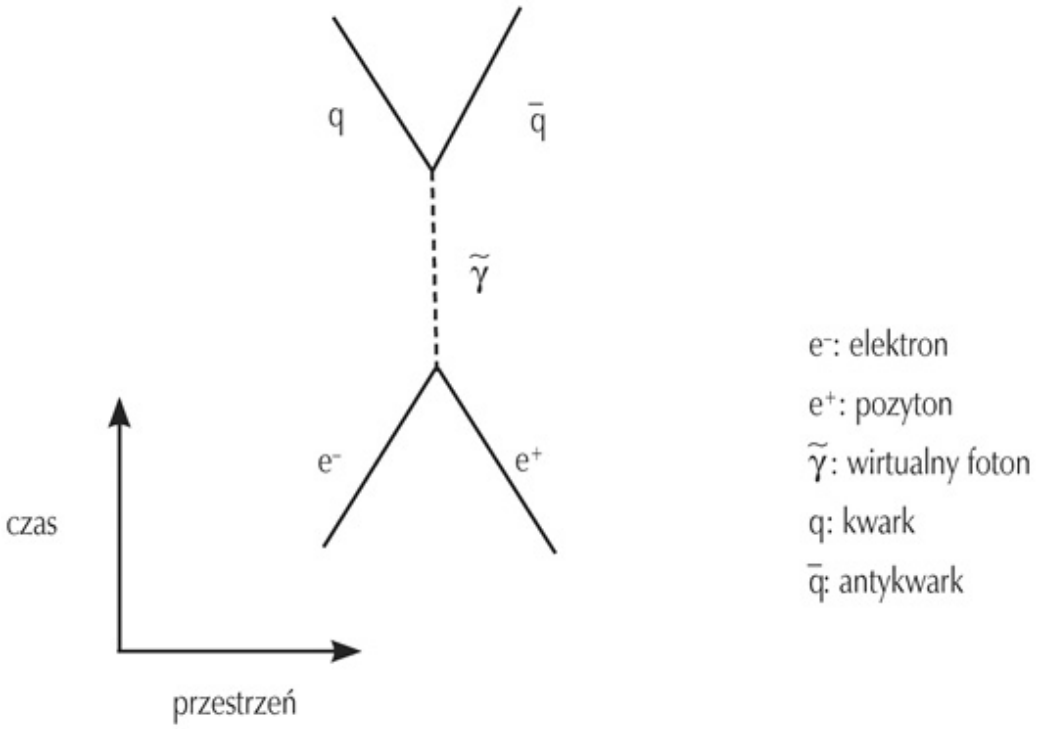
innych zastosowań). Twierdził, że poznał ją w seminarium, gdzie nauczano jej jako reguły jezuitów. Brzmi ona następująco:

> Lepiej prosić o przebaczenie, niż pytać o pozwolenie.

Przez lata intuicyjnie kierowałem się tą zasadą, nie zdając sobie nawet sprawy, że jest ona aprobowana przez Kościół. Teraz wykorzystuję ją w sposób bardziej systematyczny i mam przy tym czyste sumienie.

W fizyce teoretycznej można dostrzec niezwykłą synergię między regułą jezuitów a stwierdzeniem Einsteina: „wszystko powinno być tak proste, jak to tylko możliwe, ale nie prostsze". Razem mówią nam one, że powinniśmy przyjmować najbardziej optymistyczne założenia, na jakie nas stać, w odniesieniu do tego, jak bardzo wszystko jest proste[22]. Jeśli sprawy przybiorą zły obrót, zawsze możemy poprosić o przebaczenie i spróbować ponownie – nie czekając na pozwolenie.

W tym duchu spróbujmy przedstawić najprostszą próbę wyjaśnienia, co powstaje w wyniku omawianych wcześniej zderzeń, wychodząc od naszych idei na temat struktury wewnętrznej świata fizycznego. Zgodnie z QED elektron i jego antycząstka – pozyton – mogą ulec anihilacji, powodując powstanie wirtualnego fotonu. Ten wirtualny foton z kolei może zmienić się w kwark i antykwark. Tak twierdzi QED. Ten podstawowy proces przedstawiono na rysunku 6.3.




Rysunek 6.3. Diagram czasoprzestrzenny podstawowego procesu, w którym elektron i pozyton ulegają anihilacji i tworzą wirtualny foton. Foton ten następnie materializuje się jako para kwark-antykwark.

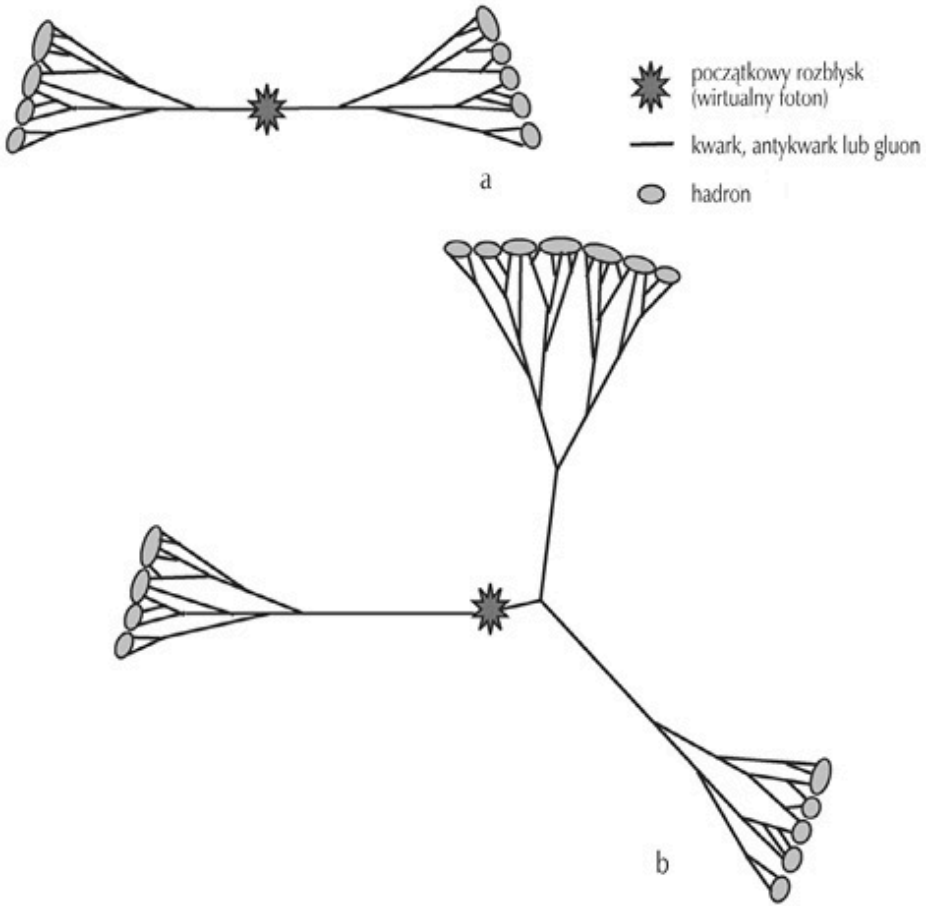
W tym momencie sprawy zaczynają wyglądać podejrzanie, ponieważ, jak mówiliśmy, kwarki (i antykwarki) nie mogą istnieć samodzielnie. Muszą być uwięzione we wnętrzu hadronów. Proces tworzenia się obłoku wirtualnych cząstek i równoważenia ładunków koloru, prowadzący od kwarków do hadronów, może być bardzo złożony. Komplikacje te mogą utrudnić wykrycie śladów pierwotnego kwarka i antykwarka, tak samo jak trudno byłoby ustalić, patrząc jedynie na rumowisko po zejściu kamiennej lawiny, który głaz ją zapoczątkował. Spróbujmy to jednak przemyśleć w duchu przytoczonej reguły, nie tracąc nadziei, że się uda znaleźć wyjaśnienie.

Dwie cząstki, kwark i antykwark, które pojawiły się w wyniku zderzenia, mają olbrzymie energie i poruszają się w przeciwnych kierunkach[23]. Przyjmijmy teraz, że proces tworzenia się obłoków i równoważenia ładunku zwykle przebiega spokojnie, za sprawą

powstawania i przestawiania ładunków koloru, bez większych zakłóceń ogólnego przepływu energii i pędu. Proces taki, w którym powstawanie cząstek nie zmienia zbytnio ogólnego przepływu, nazwijmy promieniowaniem „miękkim". W takiej sytuacji zobaczymy dwa roje cząstek poruszające się w przeciwnych kierunkach, a każdy z nich odziedziczy po kwarku i antykwarku, które wszystko to zapoczątkowały, całkowitą energię i pęd. I rzeczywiście, to właśnie najczęściej obserwujemy. Typowe zdjęcie przedstawiające ten proces pokazano na kolorowej wkładce na rycinie nr 2.

Od czasu do czasu pojawia się również „twarde" promieniowanie, które zmienia ten ogólny przepływ. Kwark lub antykwark może wypromieniować gluon. W takim przypadku zaobserwujemy trzy dżety[24] zamiast dwóch. W akceleratorze LEP taką sytuację obserwowano mniej więcej w 10% zderzeń. W przypadku 10% z owych 10% (czyli w 1% zdarzeń) pojawią się cztery dżety i tak dalej.

Na rysunku 6.4 pokazano teoretyczną interpretację naszych fotografii. Wyjaśnienia te pozwalają nam „zjeść kwarki i mieć kwarki". Chociaż swobodnych kwarków nie można nigdy zaobserwować, widzimy je za sprawą zainicjowanych przez nie strumieni cząstek. W szczególności możemy sprawdzić, czy prawdopodobieństwa powstania różnych liczb dżetów, rozbiegających się pod różnymi kątami i dzielących między sobą w różnoraki sposób całkowitą energię, zgadzają się z prawdopodobieństwami wyznaczonymi dla kwarków, antykwarków i gluonów w ramach QCD. W akceleratorze LEP doszło do setek milionów zderzeń, zatem porównanie teoretycznych przewidywań z wynikami doświadczalnymi można przeprowadzić dokładnie i bardzo szczegółowo.




Rysunek 6.4. a) Promieniowanie miękkie powoduje, że z kwarka i antykwarka powstają dżety. b) Twarde promieniowanie powoduje powstanie gluonu i w efekcie, w wyniku wystąpienia dużej ilości promieniowania miękkiego, pojawiają się trzy dżety.

Okazuje się, że to działa. Dlatego właśnie mogę z całym przekonaniem mówić, że obiekty widoczne na rycinie nr 1 kolorowej wkładki to kwark, antykwark i gluon. Abyśmy jednak mogli zobaczyć te cząstki, musimy najpierw poszerzyć nasze wyobrażenia na temat tego, co to znaczy, że coś widzimy – i rozumienie tego, czym jest cząstka.

Wynieśmy nasze rozumienie fotografii kwarków i gluonów na wyżyny poznania, wiążąc je z dwoma wielkimi ideami: swobodą asymptotyczną i mechaniką kwantową.

Istnieje pewien bezpośredni związek między kwarkami i gluonami pojawiającymi się pod postacią dżetów a swobodą asymptotyczną.

Łatwo go wyjaśnić, posługując się transformatami Fouriera, lecz niestety same transformaty Fouriera nie są już tak łatwe do objaśnienia, nie pójdziemy więc tą drogą. Proponuję wobec tego wyjaśnienie opisowe, które jest mniej precyzyjne, ale za to bardziej odwołuje się do wyobraźni (a mniej do znajomości wyższej matematyki).

Aby wyjaśnić, dlaczego kwarki i gluony obserwujemy (jedynie) w postaci dżetów, musimy wytłumaczyć, dlaczego promieniowanie miękkie pojawia się tak często, a twarde – rzadko[25]. Pojęcie swobody asymptotycznej zasadza się na dwóch kluczowych ideach: po pierwsze, że wewnętrzny ładunek koloru cząstek elementarnych – czy to kwarków, antykwarków, czy gluonów – jest mały i niezbyt mocny; po drugie, że otaczający cząstkę elementarną obłok cząstek wirtualnych jest cienki w jej pobliżu, ale robi się coraz grubszy na większych odległościach. To właśnie otaczający cząstkę elementarną obłok wzmacnia siłę jej oddziaływania i to on, a nie właściwy cząstce ładunek, powoduje, że oddziaływanie silne jest tak silne.

Do promieniowania dochodzi wtedy, gdy równowaga między cząstką a jej obłokiem zostaje zachwiana. W takiej sytuacji przetasowania przywracające równowagę w polach ładunku koloru powodują wypromieniowanie gluonów lub par kwark-antykwark. Można to porównać do przetasowań w polach elektrycznych atmosfery powodujących błyskawice lub do zmian ułożenia płyt tektonicznych wywołujących trzęsienia ziemi i wybuchy wulkanów. W jaki sposób kwark (lub antykwark czy gluon) może utracić równowagę ze swoim obłokiem? Jedną z sytuacji, gdy do tego dochodzi, jest nagłe pojawienie się takiej cząstki w wyniku rozpadu wirtualnego fotonu, jak w omawianych przez nas doświadczeniach w akceleratorze LEP. By osiągnąć równowagę, nowo powstały kwark musi zbudować swój obłok, zaczynając od środka – gdzie jego niewielki ładunek koloru inicjuje cały proces – i stopniowo rozszerzając go na coraz większe odległości. Zachodzące w tym procesie zmiany są niewielkie i stopniowe, zatem wymagają jedynie niewielkich przepływów energii i pędu – to znaczy, mamy

do czynienia z promieniowaniem miękkim. Inna sytuacja, w której równowaga kwarka i jego obłoku może zostać zaburzona, pojawia się, gdy kwark zostaje popchnięty przez fluktuacje kwantowe pól gluonowych. Jeżeli popchnięcie to jest gwałtowne, może doprowadzić do pojawienia się promieniowania twardego. Ponieważ jednak właściwy kwarkowi podstawowy ładunek koloru jest niewielki, reakcja kwarka na fluktuacje kwantowe pól gluonowych jest zwykle umiarkowana i dlatego do emisji promieniowania twardego dochodzi rzadko. To tłumaczy, dlaczego pojawienie się trzech dżetów jest mniej prawdopodobne niż dwóch.

Związek naszych fotografii z głębią mechaniki kwantowej jest jeszcze bardziej bezpośredni i by go zauważyć, nie trzeba tak rozbudowanego wyjaśnienia. Chodzi o to, że po raz kolejny przekonujemy się, iż przeprowadzanie raz za razem tego samego doświadczenia kończy się uzyskaniem za każdym razem innych wyników. Zauważyliśmy to wcześniej, przy okazji omawiania ultrastroboskopowego nanomikroskopu robiącego zdjęcia protonów; spotykamy się z tym i teraz, omawiając urządzenie do wywoływania twórczej destrukcji, które robi zdjęcia pustej przestrzeni. Gdyby świat zachowywał się w sposób klasyczny i przewidywalny, miliard euro zainwestowany w budowę akceleratora LEP pozwoliłby na skonstruowanie bardzo nudnego urządzenia: każde kolejne zderzenie odtwarzałoby po prostu wyniki pierwszego i moglibyśmy podziwiać tylko jedną fotografię. Nasze kwantowomechaniczne teorie przewidują jednak, że taka sama przyczyna może wywołać wiele różnych rezultatów. I o tym się właśnie przekonujemy. Możemy przewidzieć względne prawdopodobieństwa różnych wyników. Powtarzając wielokrotnie doświadczenie, możemy te przewidywania dokładnie sprawdzić. W ten sposób udaje nam się okiełznać krótkoterminową nieprzewidywalność. W końcu idea krótkoterminowej nieprzewidywalności doskonale daje się pogodzić z długoterminową dokładnością.

9 William Szekspir, Romeo i Julia, akt II, scena II [w:] W. Szekspir, Romeo i Julia, Hamlet, Makbet, przeł. Stanisław Barańczak, Znak, Kraków 2006, s. 59 (przyp. tłum.).

10 Książka *50 Years of Yang–Mills Theory* pod redakcją Gerardusa ‘t Hoofta to ważny zbiór artykułów czołowych ekspertów w dziedzinie fizyki, która rozwinęła się na gruncie równań Yanga–Millsa.

11 Stwierdzenie „bez potrzeby analizowania próbek statystycznych lub dokonywania jakichkolwiek pomiarów” jest (niezwykle lekką) przesadą. Byłaby to prawda, gdyby wszystkie kwarki miały albo zerową, albo nieskończenie dużą masę. Skończone, niezerowe wartości ich mas mogą wynikać jedynie z pomiarów lub analizy próbek statystycznych. W Przyrodzie kwarki *u* i *d* mają masy bliskie zera, jeśli porównamy je z masą protonów czy neutronów, natomiast kwarki *c*, *b* oraz *t* są tak ciężkie, że odgrywają znikomą rolę w budowie struktury protonów i neutronów, nawet pod postacią cząstek wirtualnych. Kwark dziwny *s* znajduje się gdzieś pośrodku: odgrywa pewną rolę w strukturze protonów i neutronów, ale nie jest to rola zbyt duża. Można uzyskać całkiem dobrą przybliżoną teorię protonów i neutronów, jeśli będziemy udawać, że kwarki *u* i *d* mają zerową masę, a wszystkie pozostałe nieskończenie wielką, i tym samym uda się je zignorować. Taką przybliżoną teorię nazywam „lekką wersją QCD”. W lekkiej wersji QCD naprawdę nie trzeba dokonywać jakichkolwiek pomiarów ani analizować próbek statystycznych.

Einstein wielokrotnie podkreślał potrzebę idealnych, czysto pojęciowych teorii, które nie wymagają wprowadzania wyników żadnych pomiarów czy analiz próbek statystycznych. W swoich *Zapiskach autobiograficznych* tak napisał: „Chciałbym w tym miejscu przedstawić pogląd, który obecnie może się opierać tylko na wierze w prostotę, czyli poznawalność rozumową natury: nie istnieją arbitralne stałe tego rodzaju; innymi słowy, natura ma tę właściwość, że da się sformułować prawa logicznie tak silnie zdeterminowane, że przejawiają się w nich tylko stałe całkowicie określone rozumowo (a więc nie takie, których wartości liczbowe można zmienić, nie niszcząc teorii)”. Lekka wersja QCD jest rzadkim przykładem potężnej teorii tego właśnie rodzaju. (Uwaga dla znawców tematu: innym przykładem jest teoria chemii strukturalnej oparta na równaniu Schrödingera, w której przyjęto, że jądra atomowe mają nieskończenie dużą masę). Zagadnienie to wiąże się ściśle z kwestią ustalania wartości parametrów, która pojawia się w rozdziale dziewiątym, oraz z filozoficznymi i metodologicznymi rozważaniami z rozdziałów dwunastego i dziewiętnastego.

Ponieważ kwarki nie występują jako samodzielne cząstki, na pojęcie ich masy należy zwrócić szczególną uwagę. W krótkich czasach i na małych odległościach kwarki poruszają się tak, jak gdyby były swobodne (swoboda asymptotyczna). Możemy rachunkowo określić niektóre konsekwencje wynikające z takiego ruchu – zależą one oczywiście od przyjętej wartości masy kwarków. Dzięki temu, porównując uzyskane z obliczeń wartości z wynikami pomiarów z doświadczeń, możemy określić poprawną wartość masy. Metoda ta dobrze się sprawdza w przypadku cięższych kwarków. W przypadku lżejszych bardziej praktycznym

sposobem jest wyznaczenie wkładu ich masy do masy zawierających je hadronów, jak to opisano w rozdziale dziewiątym. Intuicyjnie wiemy, że mówiąc o masie kwarka, mamy na myśli masę *gołego* kwarka, bez otaczającego go obłoku cząstek wirtualnych.

12 Zapachów kwarków nie należy mylić z kolorami ich ładunków. Ładunek koloru jest inną, dodatkową własnością. Jedne kwarki górne mogą mieć jednostkę ładunku czerwonego, inne mają jednostkę ładunku niebieskiego i tak dalej. Zatem, ponieważ mamy do czynienia z trzema zapachami i trzema kolorami, w sumie istnieje $3 \times 3 = 9$ różnych rodzajów kwarków.

13 Mówiąc ściśle, prawa mechaniki kwantowej są uniwersalne: stosują się do makroskopowych układów planetarnych tak samo jak do mikroskopowych, takich jak atomy. Jednak w przypadku układów makroskopowych kwantowe ograniczenia dotyczące orbit nie mają praktycznego znaczenia, ponieważ odległości między dozwolonymi orbitami są niezwykle małe.

14 Mówiąc „w takich samych warunkach", zakładamy, że w opisie protonów nie występują żadne ukryte zmienne – to znaczy, że jedynymi ich stopniami swobody są: położenie cząstki i kierunek jej spinu. Wszystkie zastosowania statystyki Fermiego do protonów opierają się na takim założeniu. Odnoszone sukcesy są bardzo mocnym dowodem przemawiającym za słusznością takiej tezy.

15 Wiąże się to z pewną bardzo interesującą i ważną kwestią, dotyczącą nie tylko kwarków, lecz także protonów, jąder atomowych, całych atomów i cząsteczek. Omówmy ją na przykładzie protonów. Jak wspomniałem w poprzedniej uwadze, mamy solidne dowody przemawiające za tym, że stan protonu jest w pełni określony przez jego położenie i spin. A przecież nasza najlepsza teoria protonów przedstawia je jako układy złożone z kwarków i gluonów, dokładniej zaś (odwołując się do dalszych rozdziałów: siódmego i ósmego) jako skomplikowane wzory zaburzeń Siatki. Jak to się dzieje, że cała ta struktura gdzieś się chowa? Jeżeli w środku tych cząstek wszystko wciąż drga, dlaczego protony nie mogą przyjmować większej różnorodności stanów, zależnie od tego, co wyczyniają elementy znajdujące się w ich wnętrzu?

W fizyce klasycznej mielibyśmy w takim przypadku do czynienia z wieloma możliwymi stanami wewnętrznymi – czy też, innymi słowy, z wieloma „ukrytymi zmiennymi". Stany te jednak znikają za sprawą Kwantowego Cenzora. Z teorii kwantowej (znowu wybiegamy w przód, do rozdziału dziewiątego) wiemy, że proton – czy dowolny inny układ kwantowy – zawiera jednocześnie wszystkie możliwe stany wewnętrzne z różnymi amplitudami prawdopodobieństwa. Aby uzyskać stan *kwantowy* o najniższej energii, proton składa ze sobą wiele stanów

*klasycznych*, każdy z odpowiednią amplitudą. Kolejny pod względem wartości energii stan ma już zupełnie inny zbiór amplitud i znacznie wyższą energię. W efekcie proton trzeba zaburzyć *dosyć silnie*, aby *choć trochę* zmienił swoją strukturę wewnętrzną. Niewielkie zaburzenia nie dostarczają energii wystarczającej do przegrupowania amplitud. Dlatego w przypadku niewielkich zaburzeń mamy do czynienia zawsze z jednym i tym samym zbiorem amplitud; różnorodność została wycięta przez cenzurę. W ten sposób wewnętrzna struktura cząstki nie zostaje dopuszczona do głosu. Przypomina to kulę śnieżną, twardą i sztywną, mimo że składa się z mnóstwa cząsteczek, które w wyższej temperaturze odpłynęłyby, zmieniając się w ciekłą wodę.

Z punktu widzenia matematyki lepszym porównaniem jest fizyka instrumentów muzycznych. Gdy odpowiednio zagramy na flecie, wydobędzie się z niego określony, żądany dźwięk (zależny oczywiście od ułożenia palców). Jeżeli jednak zadmiemy zbyt mocno lub nierówno, z instrumentu zaczną się wydobywać piski i różne składowe harmoniczne. Prawidłowy dźwięk odpowiada konkretnemu – w szczegółach dosyć złożonemu – układowi drgań powietrza wewnątrz fletu. Wyższe składowe harmoniczne odpowiadają zupełnie innym wzorcom drgań. W teorii kwantowej mamy do czynienia z drgającą funkcją falową zamiast drgań powietrza, ale odpowiednie pojęcia i wzory matematyczne są bardzo podobne. Tak naprawdę, gdy odkryto „nową" teorię kwantową wykorzystującą funkcje falowe, fizycy w poszukiwaniu matematycznych wskazówek odkurzyli podręczniki akustyki.

To właśnie za sprawą Kwantowego Cenzora te pozornie radykalne idee dotyczące głębokiej struktury materii mogą nie mieć tak naprawdę większego praktycznego znaczenia. Często wysuwa się na przykład hipotezę, że kwarki są w gruncie rzeczy strunami. A przecież mamy dokładną teorię – QCD – wyjaśniającą wiele precyzyjnych doświadczeń (jak dotąd wszystkie, które przeprowadzono), mimo że nie uwzględnia ona takiej ewentualności. Jak to możliwe?

Jeżeli kwarki są tak naprawdę strunami, to kwantowomechaniczna funkcja falowa kwarka będzie obejmowała konfiguracje takiej struny o wielu różnych rozmiarach i kształtach wraz z odpowiednimi amplitudami. Wraz z upływem czasu te różne konfiguracje będą wzajemnie w siebie przechodziły, ale ogólny rozkład nie ulegnie zmianie.

Jeśli tylko rozkład amplitud konfiguracji struny pozostanie taki sam, zmiany układu struny nie będą miały znaczenia i będą niewykrywalne. Zmiana tego rozkładu może wymagać użycia bardzo dużej energii. Wewnętrzne, strunowe stopnie swobody będą niewidoczne w doświadczeniach, w których nie przekroczy się tej energii krytycznej. Z praktycznego punktu widzenia równie dobrze mogłyby one nie istnieć. Nikt nie ma pewności, jaka jest owa krytyczna wartość energii dla drgań struny kwarka, musi ona być jednak znacznie większa od energii osiąganych w używanych przez nas dotąd akceleratorach.

16 Tak naprawdę nieliczni naprawdę mądrzy eksperci od mechaniki kwantowej, szczególnie James Bjorken, przedstawili jeszcze bardziej skomplikowane rozumowanie, z którego wynikało, że podejście to może się jednak sprawdzić w praktyce.

17 Dlatego siła maleje szybciej niż jeden podzielone przez kwadrat odległości, jak by się działo, gdyby nie było ekranowania.

18 Gdy razem z Grossem odkryliśmy swobodę asymptotyczną, byliśmy młodzi i naiwni, nie zdawaliśmy sobie sprawy z tego, jak ważne jest nadawanie atrakcyjnych nazw. Gdybym miał okazję zrobić to jeszcze raz, nadałbym swobodzie asymptotycznej jakąś seksowną nazwę, na przykład „ładunek bez ładunku". Nazwę „swoboda asymptotyczna" zasugerował nam mój dobry przyjaciel Sidney Coleman, któremu niniejszym to wybaczam.

19 W roku 1973 stanowiły one dużo większe wyzwanie niż obecnie, ponieważ technika obliczeniowa poczyniła do tej pory duże postępy.

20 Ciekawie napisaną historię idei i doświadczeń prowadzących do powstania teorii QCD można znaleźć w książce Michaela Riordana *The Hunting of the Quark*. Dwie dobre, przystępnie napisane książki na temat fizyki QCD i Modelu Standardowego oddziaływań elektrosłabych to: *The Theory of Almost Everything* Roberta Oertera i *The New Cosmic Onion* Franka Close'a. Richard Feynman napisał natomiast książkę, która wyjaśnia teorię QED od samych podstaw – jest to wyjątkowa, absolutnie obowiązkowa lektura: *QED: osobliwa teoria światła i materii*.

21 Nie chodzi tu o skok kwantowy: skoki kwantowe są mniejsze.

22 Oczywiście pojęcie „prostoty" jest bardzo złożone – zob. rozdział dwunasty.

23 Powodem tego jest konieczność zachowania całkowitego pędu. Na początku był on zerowy, ponieważ elektrony i pozytony poruszały się z taką samą prędkością w przeciwnych kierunkach. Musi być zatem równy zero również na końcu, i tak właśnie jest. Oczywiście, w zasadzie moglibyśmy doświadczalnie odkryć, że pęd nie jest zachowany, ale w takiej sytuacji musielibyśmy cofnąć się do początku i zapomnieć wszystko, czego nauczyliśmy się na pierwszym roku fizyki.

24 Słowem dżet fizycy określają obserwowane w akceleratorach strumienie cząstek podążających w jednym kierunku, będące wynikiem kolejnych rozpadów.

Słowo to pochodzi od ang. jet – strumień, struga (przyp. tłum.).

25 Bardziej eleganckie rozróżnienie między promieniowaniem miękkim i twardym zasadza się na związku między pędem gluonu a długością fali jego funkcji falowej. Mały pęd odpowiada dużej długości fali. Długie fale nie rozbijają wewnętrznej struktury obłoku kwarka, reagują więc na obłok jako całość, na powodowane przez niego wzmocnienie ładunku koloru w wyniku antyekranowania. Krótkie fale natomiast rozszczepiają jego strukturę wewnętrzną. Maksima i minima takich fal równoważą zwykle swoje oddziaływanie z obłokiem i znaczenie ma jedynie wkład wnoszony przez odsłonięty teraz ładunek zarodkowy.

# Rozdział 7

# Ucieleśnienie symetrii

*Gluony ładunku koloru są inkarnacją idei: ucieleśnieniem symetrii.*

Główną ideą QCD jest symetria. *Symetria* to słowo powszechnie używane[26] i, jak w przypadku wielu takich określeń, jego znaczenie uległo pewnemu rozmyciu. Symetria może oznaczać równowagę, miłe oku proporcje czy regularność. W matematyce i fizyce znaczenie tego słowa obejmuje wszystkie wymienione idee, ale w sposób bardziej jednoznaczny.

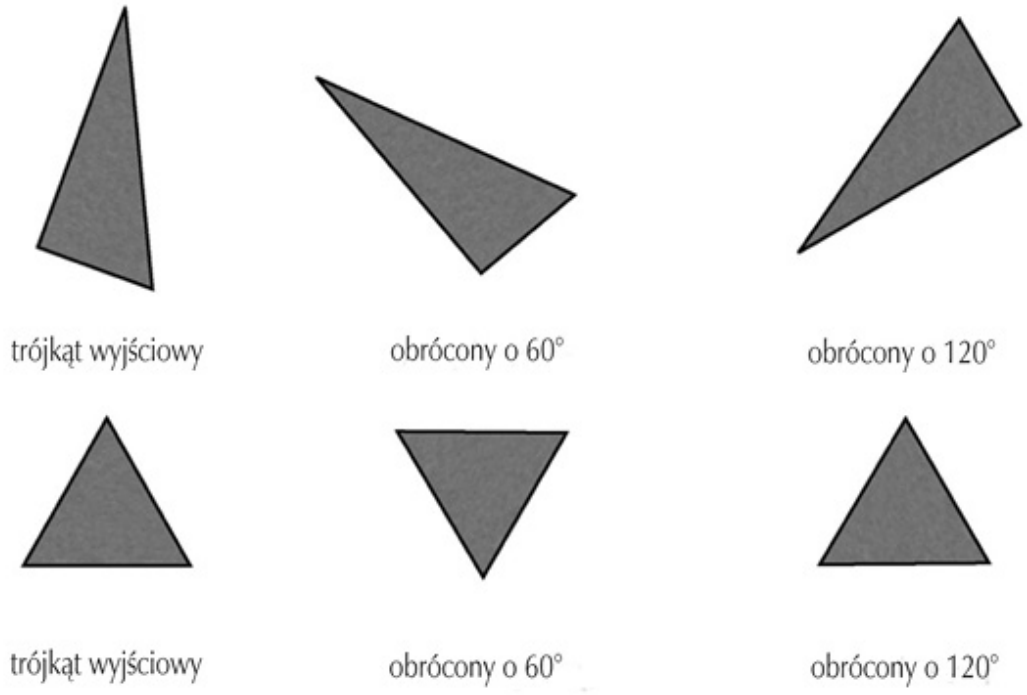
Definicja, którą lubię się posługiwać, brzmi: *symetria oznacza, że mamy do czynienia z rozróżnieniem formalnym*.

Terminem „rozróżnienie formalne" posługują się również prawnicy. W tym przypadku używa się go najczęściej w sytuacjach, gdy tę samą kwestię wyraża się innymi słowami albo – mówiąc bardziej dosadnie – gdy chodzi o dzielenie włosa na czworo. Jako przykład niech nam posłuży cytat z komika Alana Kinga:

> Prawnik ostrzegł mnie, że jeżeli umrę, nie sporządziwszy testamentu, spocznę w grobie jako intestat.

Matematyczne pojęcie symetrii najłatwiej będzie nam zrozumieć na konkretnym przykładzie. Posługując się trójkątami, możemy zbudować zgrabny ciąg przykładów pokazujący najważniejsze idee w łatwo przyswajalny sposób (zob. rysunek 7.1). Trójkąty, po obróceniu, się nie zmieniają (rysunek 7.1a). Trójkąty

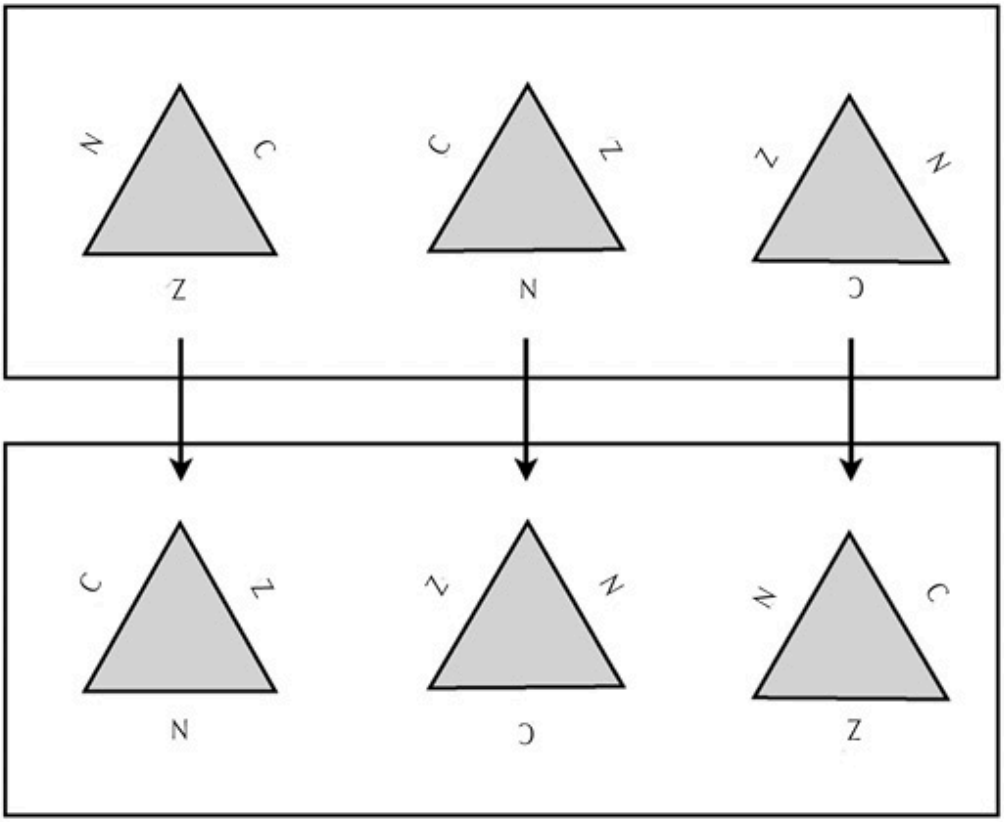
równoboczne są jednak pod tym względem szczególne. Jeżeli taki trójkąt obrócimy o 120° lub 240° (dwa razy większy kąt), to obrócony trójkąt będzie wyglądał tak samo jak w pozycji wyjściowej (rysunek 7.1b). Trójkąt równoboczny ma nietrywialną symetrię, ponieważ pozwala na czynienie *rozróżnień* (między trójkątem i jego obróconą wersją), które w ostatecznym rozrachunku są jedynie *formalne* (obrócona wersja jest taka sama jak trójkąt w pozycji wyjściowej). I przeciwnie, jeżeli ktoś powie nam, że jakiś trójkąt wygląda tak samo po obróceniu go o 120°, możemy domyślać się, iż jest to trójkąt równoboczny (albo że osoba ta kłamie).




Rysunek 7.1. Prosty przykład symetrii. a) Trójkąta o różnych bokach nie można obrócić tak, by nie było widać różnicy. b) Jeżeli trójkąt równoboczny obrócimy o 120° wokół jego środka, nie będziemy mogli go odróżnić od trójkąta wyjściowego.

Kolejnym poziomem komplikacji będzie rozważenie układu trójkątów równobocznych o różnych rodzajach boków (zob. rysunek 7.2). Jeżeli teraz obrócimy jeden z takich trójkątów o 120°, nie

uzyskamy stanu wyjściowego – boki nie będą do siebie pasowały. Na rysunku 7.2 pierwszy trójkąt (CNZ) po obróceniu przekształca się w drugi (NZC), ten po obrocie staje się trzecim trójkątem (ZCN), a gdy obrócimy trzeci trójkąt, uzyskamy pierwszy. Jednak cały *zbiór*, zawierający *wszystkie trzy trójkąty*, nie ulega zmianie.




Rysunek 7.2. Bardziej skomplikowany przykład symetrii. Trójkąty równoboczne o bokach w różnych „kolorach” (w tym przypadku sugerowane kolory to C[zerwony], N[iebieski] i Z[ielony]) wyglądają inaczej po obróceniu o 120°; jednak cały *zestaw trzech trójkątów* przechodzi wówczas w siebie.

I przeciwnie, jeżeli ktoś powie nam, że grupa trójkątów o trzech różnych bokach wygląda tak samo po obrocie o 120°, możemy się domyślać, że są to trójkąty równoboczne oraz że grupę tworzą trzy takie trójkąty o różnym ułożeniu boków (albo że osoba ta kłamie).

Dodajmy jeszcze jedną, ostatnią już komplikację. Zamiast trójkątów o bokach w różnych kolorach rozważmy prawa rządzące tymi trójkątami. Na przykład proste prawo mogłoby głosić, iż jeżeli się trójkąt ściśnie, to odkształci się on równomiernie tak, że jego boki ulegną wygięciu. Przypuśćmy teraz, że badaliśmy tylko trójkąty CNZ i jedynie w przypadku tych trójkątów możemy stwierdzić, iż prawo to obowiązuje. Jeżeli będziemy wiedzieli, że obrót o 120° jest jedynie formalnym rozróżnieniem – to znaczy, że obrót o 120° określa symetrię w matematycznym znaczeniu tego słowa – to będziemy mogli wywnioskować nie tylko to, że muszą istnieć inne rodzaje trójkątów, lecz także to, że te pozostałe trójkąty także będą się równomiernie odkształcały, gdy się je ściśnie.

Ten ciąg przykładów ukazuje w prosty sposób potęgę symetrii. Jeżeli wiadomo, że dany obiekt ma symetrię, można domyślić się niektórych jego własności. Jeżeli wiadomo, że zbiór obiektów ma symetrię, można na podstawie znajomości jednego z nich domyślić się istnienia pozostałych i odgadnąć niektóre ich własności. A jeżeli wiadomo, że prawa rządzące światem mają symetrię, można na podstawie znajomości jednego obiektu domyślić się istnienia, własności i sposobu zachowania się nowych obiektów.

We współczesnej fizyce symetria okazała się nieocenioną wskazówką pozwalającą przewidzieć nowe formy materii i opracować nowe, bardziej ogólne prawa. Szczególną teorię względności można na przykład uważać za postulat symetrii. Mówi ona, że równania fizyczne powinny wyglądać tak samo, jeżeli przekształcimy wszystkie ich wyrazy, dodając do ich prędkości takie samo, stałe „pchnięcie” (czynnik zwiększający prędkość). Owo pchnięcie powoduje, że dany świat zmienia się w inny, drugi świat, który porusza się ze stałą prędkością względem pierwszego. W świetle szczególnej teorii względności jest to jedynie rozróżnienie formalne – zachowanie ciał w obydwu światach opisują i tak te same równania.

Chociaż szczegóły są bardziej skomplikowane, metody wykorzystania symetrii do zrozumienia naszego świata są zasadniczo takie same jak te, którymi posłużyliśmy się w naszych prostych przykładach ze świata trójkątów. Zakładamy, że równania zostały przekształcone w sposób, który mógł w zasadzie je zmienić –

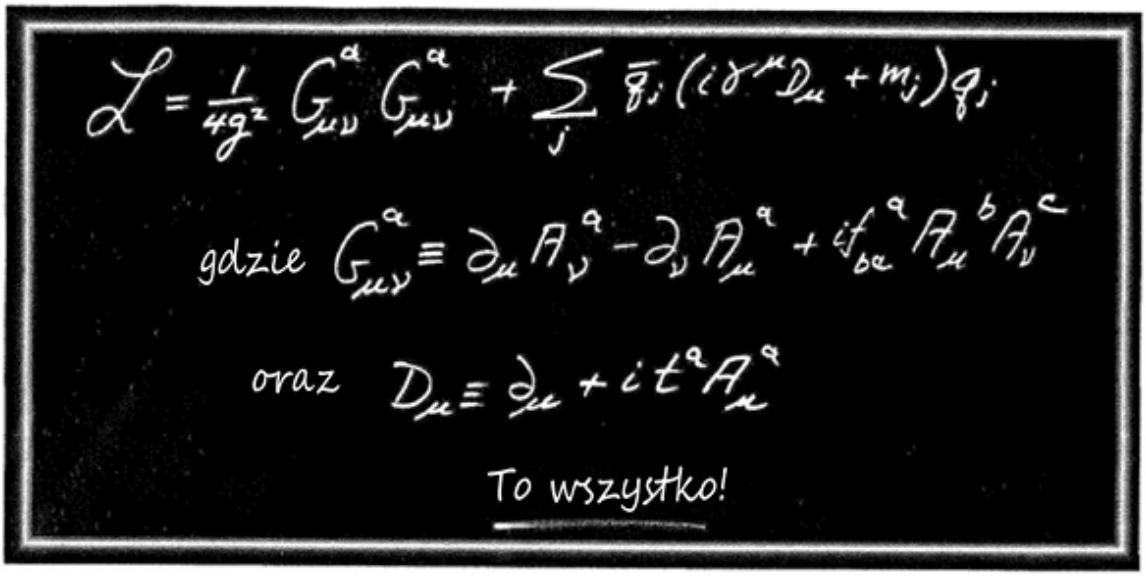
a potem chcemy, żeby tak naprawdę nie ulegały wówczas zmianie. Możliwe rozróżnienia mają charakter jedynie formalny. Podobnie jak w przypadku przykładów ze świata trójkątów, również w sytuacji ogólnej musi być spełnionych kilka warunków, żeby mogła obowiązywać symetria. Wyrazy pojawiające się w równaniach powinny mieć szczególne własności, występować w powiązanych ze sobą zbiorach i podlegać ściśle związanym ze sobą prawom.

Zatem symetria może być bardzo potężną ideą, z której wynikają daleko idące konsekwencje. Ideę tę bardzo sobie również upodobała Natura. Przygotujcie się na nieokiełznany wybuch uczuć.

## Równania, łączniki i patyczki

Teoria kwarków i gluonów nosi miano chromodynamiki kwantowej, w skrócie QCD. Równania QCD pokazano na rysunku 7.3[27].

Całkiem zwięzłe, prawda? Fizyka jądrowa, nowe cząstki, dziwaczne zachowania, źródło masy – wszystko tam jest!




Rysunek 7.3. Wypisana tu funkcja Lagrange'a $\mathcal{L}$ teorii QCD jest w zasadzie pełnym opisem oddziaływania silnego. Symbole $m_j$ oraz $q_j$ oznaczają

odpowiednio masę i pole kwantowe kwarka o *j*-tym zapachu, *A* jest zaś polem gluonowym o indeksach czasoprzestrzennych $\mu$, $\nu$ i indeksach koloru *a*, *b*, *c*. Wartości współczynników liczbowych *f* oraz *t* są całkowicie określone przez symetrię koloru. Oprócz mas kwarków jedynym parametrem swobodnym teorii jest stała sprzężenia *g*. W praktyce, żeby cokolwiek obliczyć, korzystając z $\mathcal{L}$, trzeba się wykazać nie lada pomysłowością i włożyć w to dużo wytężonej pracy.

Tak naprawdę nie powinniśmy się chyba spieszyć z wyrażaniem zdumienia faktem, że potrafimy zapisać równania w zwartej postaci. W końcu nasz sprytny przyjaciel Feynman pokazał, jak można zapisać w jednej linii równanie całego Wszechświata. Oto ono:

$$N = 0 \quad (1)$$

(1)

*N* jest ściśle określoną funkcją matematyczną: całkowitą nierealnością. Jest ona sumą wkładów wnoszonych przez wszystkie te drobiazgowe prawa fizyki. Mówiąc ściśle, $N = N_{\text{Newton}} + N_{\text{Einstein}} + \ldots$ . I tak na przykład newtonowska mechaniczna nierealność $N_{\text{Newton}}$ jest dana równaniem $N_{\text{Newton}} = (F - ma)^2$ ; einsteinowska nierealność masy-energii $N_{\text{Einstein}}$ jest określona przez równość $N_{\text{Einstein}} = (E - mc^2)^2$ ; i tak dalej. Ponieważ każda z tych części składowych wnosi wkład dodatni lub równy zero, całkowita nierealność *N* zniknie jedynie w przypadku, gdy zniknie każda z jej części składowych, zatem z $N = 0$ wynika, że $F = ma$, $E = mc^2$, a także prawdziwość wszelkich przeszłych i przyszłych praw, które zechcielibyśmy tu wymienić!

W ten sposób w jednym zunifikowanym równaniu możemy objąć nie tylko wszystkie znane nam prawa fizyki, lecz także prawa, które dopiero zostaną odkryte w przyszłości. Teoria Wszystkiego!!! Oczywiście jest to całkowite hochsztaplerstwo, ponieważ w żaden inny sposób nie można wykorzystać (ani nawet zdefiniować) *N*, tylko dekomponując tę funkcję na jej elementy składowe i posługując się jedynie tymi elementami.

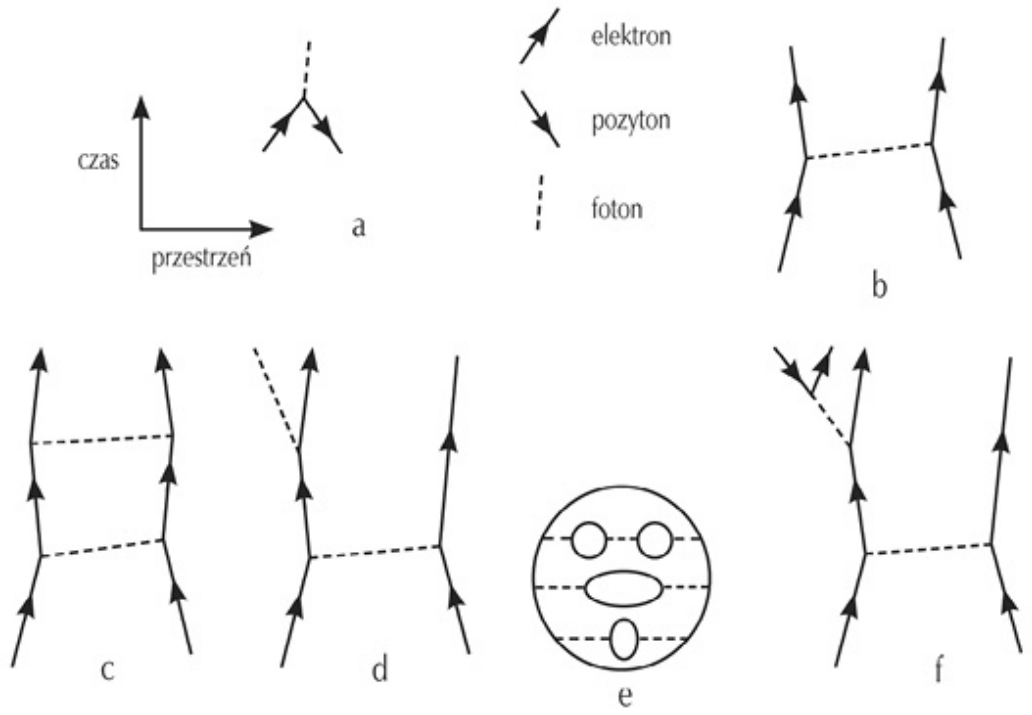
Równania przedstawione na rysunku 7.3 prawie w niczym nie przypominają żartobliwej unifikacji Feynmana. Podobnie jak w przypadku $N = 0$, w głównych równaniach QCD zakodowano wiele oddzielnych mniejszych równań. (Uwaga dla znawców tematu: główne równania wykorzystują macierze tensorów i spinorów; owe mniejsze równania operują zwyczajnymi liczbami). Jest jednak pewna istotna różnica. Po rozpakowaniu równania $N = 0$ otrzymamy grupę niezwiązanych ze sobą równości. Po rozpakowaniu głównych równań QCD uzyskujemy równania powiązane ze sobą symetrią – symetrią kolorów, różnych kierunków w przestrzeni oraz symetrią szczególnej teorii względności występującą między układami poruszającymi się ze stałą prędkością. Ich pełna zawartość znajduje się przed naszymi oczyma, a algorytmy pozwalające je rozpakować wynikają z jednoznacznej matematyki symetrii. Mogę więc was zapewnić, że w tym przypadku naprawdę powinniście być pod wrażeniem. To prawdziwie elegancka teoria.

Jednym z przejawów owej elegancji jest to, że istotę QCD można bez większych zniekształceń przedstawić na kilku prostych ilustracjach. Pokazano je na rysunku 7.5. Za chwilę omówimy je szczegółowo.

Najpierw jednak, dla porównania i w ramach rozgrzewki, chciałbym w podobnej formie przedstawić istotę elektrodynamiki kwantowej (QED). Jak sugeruje jej nazwa, QED jest kwantowomechanicznym opisem elektrodynamiki. Jest to teoria nieco starsza od QCD. Podstawowe równania QED pojawiły się już w 1931 roku, ale przez dosyć długi okres uczeni wciąż popełniali błędy, próbując je rozwiązać, i uzyskiwali bezsensowne (nieskończone) odpowiedzi – z tego powodu równania te uzyskały złą reputację. Około roku 1950 kilku znakomitych teoretyków (Hans Bethe, Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman i Freeman Dyson) wyjaśniło wszystkie problemy.

Istotę QED można przedstawić z pomocą jednej ilustracji, którą pokazano na rysunku 7.4a. Widać na nim, że foton reaguje na obecność bądź ruch ładunku elektrycznego. Chociaż wydaje się on dosyć schematyczny, ten niewielki rysunek jest czymś znacznie więcej niż tylko przenośnią. Stanowi mianowicie podstawowy

element procesu ścisłego odwzorowania graficznego systematycznej metody rozwiązywania równań QED, który zawdzięczamy Feynmanowi. (Tak, znowu jemu. Przykro mi, Murray). Diagramy Feynmana pokazują procesy w przestrzeni i czasie, w których cząstki przemieszczają się z danego miejsca i czasu do innego miejsca w pewnym późniejszym czasie. Po drodze mogą na siebie wzajemnie wpływać. W elektrodynamice kwantowej możliwe procesy i wpływy rozbudowuje się, łącząc linie świata (to znaczy, ścieżki w przestrzeni i czasie) elektronów i fotonów w zupełnie arbitralny sposób, wykorzystując do tego proces podstawowy. Łatwiej to zrobić, niż opisać, dlatego szybciej zrozumiecie ogólną ideę, jeżeli przyjrzycie się rysunkom 7.4b–f.



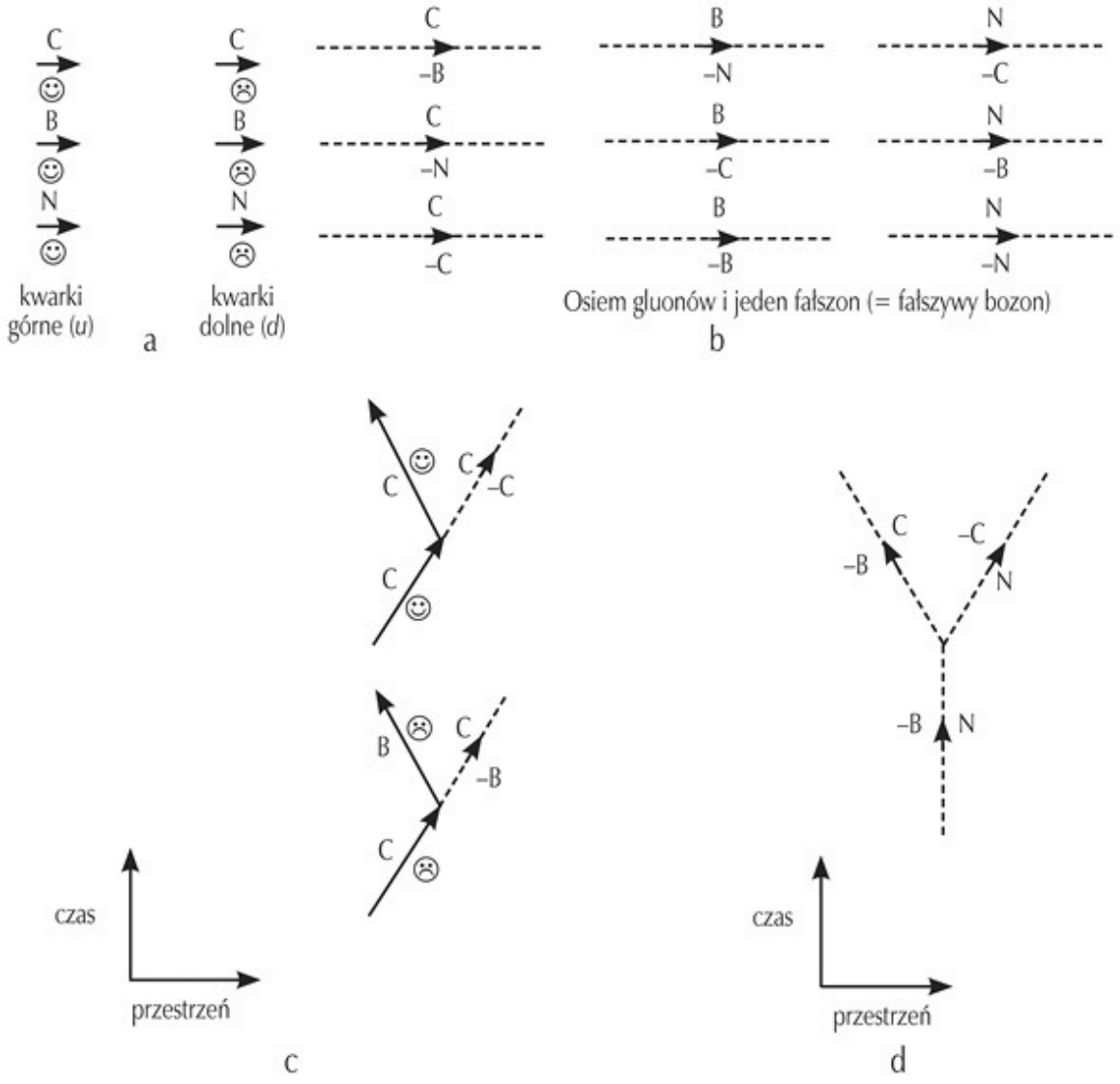

Rysunek 7.4. a) Istota QED: fotony reagują na obecność ładunku elektrycznego. b) Dobre przybliżenie siły działającej między elektronami, będącej wynikiem wymiany wirtualnych fotonów. c) Jeszcze lepsze przybliżenie uwzględnia również takie wkłady. d) Niech się stanie światłość! Rozpędzony elektron może wyemitować foton. e) Całkowicie wirtualny proces. f) Wypromieniowanie pary elektron-pozyton. Antyelektron, inaczej pozyton, oznacza się symbolem elektronu, ale z odwróconą strzałką.

W przypadku każdego diagramu Feynmana niezwykle precyzyjne reguły matematyczne określają, jak duże jest prawdopodobieństwo wystąpienia przedstawionego na nim procesu. Dla skomplikowanych procesów, w których może brać udział wiele rzeczywistych i wirtualnych cząstek obdarzonych ładunkiem oraz wiele rzeczywistych i wirtualnych fotonów, reguły te konstruuje się stopniowo, wychodząc od procesu podstawowego. Przypomina to zabawę zestawem konstrukcyjnym dla dzieci, w którym za pomocą specjalnych łączników spina się ze sobą różne patyczki. W tym porównaniu cząstki są różnymi rodzajami dostępnych patyczków, a podstawowy proces określa rodzaje łączników, które można wykorzystać do ich łączenia. Przy tak zdefiniowanych elementach reguły tworzenia z nich konstrukcji są jednoznacznie określone. Na przykład na rysunku 7.4b pokazano, jak obecność jednego elektronu wpływa na drugi. Reguły diagramów Feynmana mówią nam, jak duże jest prawdopodobieństwo, że na skutek przedstawionej na tym rysunku wymiany jednego wirtualnego fotonu elektron wykona zwrot o określony kąt. Innymi słowy, mówią o działającej sile! Diagram ten przedstawia klasyczną teorię sił elektrycznych i magnetycznych, której naucza się na pierwszych latach studiów. Na rysunku 7.4c pokazano, że w teorii tej stosuje się poprawki uwzględniające rzadziej występujące procesy, takie jak wymiana dwóch wirtualnych fotonów. Może się też zdarzyć, że foton wydostanie się na wolność, jak na rysunku 7.4d; taki proces nazywamy promieniowaniem elektromagnetycznym, a jedną z jego postaci jest światło widzialne. Mogą również zachodzić procesy, w których uczestniczą wyłącznie cząstki wirtualne, jak pokazano na rysunku 7.4e. Żadnej z uczestniczących w nich cząstek nie można zaobserwować, procesy „próżniowe” mogą się więc wydawać akademickie czy metafizyczne, ale przekonamy się, że mają one olbrzymie znaczenie[28].

Równania Maxwella dotyczące fal radiowych i światła, równania Schrödingera opisujące atomy i chemię oraz ich bardziej dopracowana wersja przedstawiona przez Diraca, obejmująca spin

i antymaterię – wszystko to i jeszcze więcej znalazło swoje wierne odzwierciedlenie w tych esach-floresach.

W tym samym obrazkowym języku QCD wygląda jak rozszerzona wersja QED. Jej bardziej złożony zestaw składników i procesów podstawowych pokazano na rysunku 7.5, któremu towarzyszy odpowiednio rozbudowany podpis.




Rysunek 7.5. a) Kwarki (antykwarki) są nośnikami jednej dodatniej (ujemnej) jednostki ładunku koloru. W teorii QCD odgrywają one rolę podobną do roli elektronów w QED. Utrudnieniem jest fakt, że istnieje kilka różnych rodzajów, inaczej zapachów, kwarków. W przypadku normalnej

materii ważne są dwa, najlżejsze z nich, nazywane *u* i *d*. (Jeśli mam być szczery, powinienem wspomnieć, że istnieją również różne zapachy elektronów, nazywane mionami i taonami, ale nie chciałem wprowadzać zbędnych komplikacji). b) Istnieje osiem różnych gluonów ładunku koloru. Każdy z nich zabiera ze sobą jednostkę jednego ładunku koloru i przynosi drugi (być może taki sam) kolor. Całkowita ilość każdego ładunku koloru zostaje zachowana. Mogłoby się wydawać, że istnieje $3 \times 3 = 9$ możliwych gluonów, ale jedna szczególna kombinacja, tak zwany singlet koloru, reagująca tak samo na wszystkie ładunki, różni się od pozostałych. Musimy ją wykluczyć, jeżeli chcemy, żeby nasza teoria pozostała doskonale symetryczna. Dlatego przewidujemy, że istnieje dokładnie osiem gluonów. Na szczęście wniosek ten został potwierdzony doświadczalnie. W teorii QCD gluony odgrywają rolę podobną do roli fotonów w QED. c) Dwa przykładowe procesy podstawowe, w których gluony albo jedynie reagują na ładunek koloru kwarka, albo jednocześnie reagują i go zmieniają. d) Jakościowo nową cechą QCD, w porównaniu z QED, jest fakt istnienia procesów, w których gluony ładunku koloru wpływają na siebie wzajemnie. W przypadku fotonów żadne takie zjawisko nie zachodzi.

Na poziomie takiego opisu obrazkowego teoria QCD bardzo przypomina QED, różni się tylko tym, że jest większa. Diagramy wyglądają podobnie; również reguły ich obliczania są zbliżone, ale w przypadku QCD mamy do dyspozycji więcej patyczków i łączników. Mówiąc ściśle, podczas gdy w QED istnieje tylko jeden rodzaj ładunku – a mianowicie ładunek elektryczny – w QCD są trzy.

Owe trzy rodzaje ładunku występujące w QCD nazywa się, bez żadnego konkretnego powodu, *kolorami*. „Kolory” te nie mają oczywiście nic wspólnego z kolorami w zwyczajowym znaczeniu tego słowa; są one raczej podobne do ładunku elektrycznego. Tak czy inaczej, będziemy je określać przymiotnikami: czerwony, biały i niebieski. Każdy kwark ma jedną jednostkę jednego z tych ładunków koloru. Poza tym występują różne gatunki kwarków, nazywane *zapachami*. W przypadku zwykłej materii liczą się jedynie dwa zapachy: górny (oznaczany symbolem *u* od ang. *up*) oraz dolny (oznaczany symbolem *d* od ang. *down*)[29]. Tak samo jak kolory kwarków nie mają żadnego związku z tym, jak one wyglądają, tak i ich „zapachy” nie mają nic wspólnego z tym, jak coś pachnie. Podkreślmy również, że te mylące obrazowe nazwy „górny” i „dolny”

(koan zen: „Jak pachnie góra?”) nie oznaczają, iż istnieje jakikolwiek związek między zapachami a kierunkami w przestrzeni. Mnie proszę za to nie winić; ilekroć mam taką okazję, nadaję cząstkom godne, naukowo brzmiące nazwy, takie jak aksjon czy enion.

Kontynuując porównanie między QED i QCD, zauważmy, że istnieją również cząstki przypominające fotony, zwane gluonami, które reagują odpowiednio na obecność lub ruch ładunku koloru, podobnie jak fotony reagują na ładunek elektryczny.

Istnieją zatem kwarki *u* z jednostką ładunku czerwonego, kwarki *d* z jednostką ładunku niebieskiego – w sumie sześć różnych możliwości. A zamiast jednego fotonu reagującego na ładunek elektryczny QCD ma osiem gluonów mogących albo reagować na różne ładunki koloru, albo zmieniać jeden ładunek koloru w drugi. Mamy więc do dyspozycji całkiem pokaźny zestaw patyczków i wiele różnych rodzajów łączników. Jeśli się weźmie pod uwagę wszystkie te możliwości, można by dojść do wniosku, że sytuacja znacznie się komplikuje i przestaje być tak przejrzysta. I rzeczywiście tak by się stało, gdyby nie górująca nad tym wszystkim symetria teorii. Na przykład jeżeli wszędzie zamienimy ładunek czerwony na niebieski, to i tak uzyskamy takie same reguły. Symetria QCD pozwala na mieszanie kolorów w sposób ciągły, ale reguły rządzące powstającymi w ten sposób mieszankami muszą być takie same jak w przypadku czystych kolorów. Ta szeroka symetria jest niezwykle potężna. Decyduje o względnej sile poszczególnych łączników.

Mimo wszystkich tych podobieństw istnieje jednak kilka kluczowych różnic między teoriami QCD i QED. Przede wszystkim reakcja gluonów na ładunek koloru, której miarą jest stała sprzężenia QCD, jest dużo bardziej energiczna niż odpowiedź fotonu na ładunek elektryczny.

Ponadto, jak pokazano na rysunku 7.5c, oprócz reagowania na ładunek koloru gluony mogą zmieniać jeden ładunek koloru w inny. Dozwolone są wszystkie możliwe tego rodzaju zmiany. Mimo to w przypadku każdego ładunku koloru spełniona zostaje zasada zachowania, ponieważ same gluony mogą przenosić niezrównoważone ładunki koloru. Jeżeli na przykład absorpcja gluonu zmienia kwark o ładunku niebieskim w kwark o ładunku

czerwonym, to wchłonięty gluon musiał przenosić 1 jednostkę ładunku czerwonego i –1 jednostkę ładunku niebieskiego. I odwrotnie, kwark o ładunku niebieskim może wyemitować gluon z 1 jednostką ładunku niebieskiego i –1 jednostką ładunku czerwonego – kwark ten stanie się wówczas kwarkiem o ładunku czerwonym.

Trzecią i najgłębszą różnicą między QCD i QED jest pewna konsekwencja omówionej właśnie drugiej cechy. Z tego, że gluony reagują na obecność i ruch ładunku koloru, a same są przy tym nośnikami niezrównoważonego ładunku koloru, wynika, iż gluony, w przeciwieństwie do fotonów, wpływają bezpośrednio same na siebie.

Fotony są natomiast elektrycznie obojętne. Praktycznie w ogóle nie reagują na obecność innych fotonów. Wszyscy o tym wiemy, nawet jeśli specjalnie się nad tą kwestią nie zastanawiamy. Gdy w słoneczny dzień rozglądamy się dokoła, otacza nas światło odbijające się we wszystkich możliwych kierunkach, a jednak możemy przez nie patrzeć w dal. Walki na miecze laserowe z *Gwiezdnych wojen* są po prostu niemożliwe. (Możliwe wyjaśnienie: film opowiada o zaawansowanej technicznie cywilizacji z galaktyki leżącej daleko, daleko stąd, może więc w mieczach zainstalowane są lasery emitujące gluony).

Każda z tych różnic powoduje, że przeprowadzanie obliczeń w teorii QCD jest znacznie trudniejsze niż w przypadku QED. Ponieważ w QCD podstawowe sprzężenie jest silniejsze niż w QED, w każdym przypadku względnie większy wkład wnoszą procesy opisywane przez bardziej skomplikowane diagramy Feynmana, z dużą liczbą wewnętrznych łączników. A ponieważ istnieją różne sposoby przepływu ładunku koloru i więcej rodzajów łączników, na każdym poziomie złożoności można utworzyć dużo więcej diagramów.

Swoboda asymptotyczna umożliwia obliczenie niektórych wielkości, na przykład ogólnych przepływów energii i pędu w dżetach. Jest to możliwe dzięki temu, że wiele przypadków emisji „miękkiego” promieniowania nie wpływa w znaczącym stopniu na ogólny przepływ i możemy je pominąć w obliczeniach. Uwagę należy skupić jedynie na niewielkiej liczbie łączników, w których dochodzi do emisji

„twardego” promieniowania. Zatem bez większego trudu, wykorzystując jedynie kartkę i ołówek, istota ludzka może wyznaczyć względne prawdopodobieństwo pojawienia się różnej liczby dżetów wyemitowanych pod różnymi kątami i z różnymi ułamkami energii całkowitej. (Oczywiście naszej istocie ludzkiej byłoby łatwiej, gdybyśmy dali jej komputer i pozwolili zaliczyć kilka lat studiów). W pozostałych przypadkach równania udało się rozwiązać – w przybliżeniu – ale wymagało to ogromnego wysiłku. W rozdziale dziewiątym omówimy te heroiczne wysiłki, dzięki którym wychodząc od bezmasowych kwarków i gluonów, udało się nam wyznaczyć masę protonu – i tym samym wskazać źródło jej pochodzenia.

## Kwarki i gluony 3.0: ucieleśnienie symetrii

Gdy staram się wyjaśnić, jak założenie istnienia olbrzymiej ilości symetrii – którą nazywamy symetrią *lokalną* – zmusiło nas, byśmy włączyli do naszych równań gluony i tym samym umożliwiło nam przewidzenie ich istnienia i własności, przypomina mi się jeden z moich ulubionych gruków Pieta Heina[30]:

> Znów spacerują chłopcy z dziewczętami,
> jak zawsze próbują wyrazić słowami,
> co trudniej powiedzieć, niż zrobić[31].

Tak czy inaczej, bierzmy się za prozę i rymy.

Gdy omawialiśmy trójkąty z kolorowymi bokami i ich symetrię, zamieściłem szczegółowy przypis mówiący o tym, że nie należy brać pod uwagę faktu, iż trójkąty te znajdują się w różnych miejscach. Takie założenie jest całkowicie logiczne i matematycznie uzasadnione. W matematyce często pomija się nieistotne szczegóły, żeby skupić uwagę na najbardziej interesujących, podstawowych cechach. W geometrii na przykład powszechnie przyjmuje się, że operujemy pojęciowo liniami o zerowej grubości, które w obydwu

kierunkach rozciągają się do nieskończoności. Jednak płynący z symetrii wniosek, że nie należy uwzględniać tego, gdzie obiekty się znajdują, wydaje się na gruncie fizyki dość osobliwy. W szczególności dziwne wydaje się, że z symetrii między czerwonym i niebieskim ładunkiem koloru wynika, iż trzeba zamienić ładunki czerwone na niebieskie, i na odwrót, wszędzie w całym Wszechświecie. Bardziej naturalne mogłoby się wydawać założenie, że zmianę taką można przeprowadzić jedynie lokalnie, bez potrzeby przejmowania się odległymi zakątkami Wszechświata.

Ten fizycznie naturalny rodzaj symetrii nazywamy symetrią *lokalną*. Symetria lokalna jest dużo ważniejszym założeniem niż alternatywna symetria globalna. Lokalna symetria jest bowiem olbrzymim zbiorem oddzielnych symetrii – mówiąc w uproszczeniu, odrębnych symetrii dla każdego punktu przestrzeni i czasu. W naszym przykładzie możemy dokonać zamiany ładunków czerwonych i niebieskich w dowolnym miejscu i w jakiejkolwiek chwili. Każde miejsce i chwila mają zatem własną symetrię. W przypadku symetrii globalnej musimy dokonać takiej samej zamiany wszędzie i w każdej chwili – dlatego zamiast nieskończenie wielu niezależnych symetrii mamy tylko jedną standardową jej wersję.

Ponieważ symetria lokalna jest założeniem dużo większego kalibru niż symetria globalna, nakłada więcej ograniczeń na równania, czyli innymi słowy, na postać praw fizycznych. Ograniczenia wynikające z symetrii lokalnej są tak surowe, że na pierwszy rzut oka odnosi się wrażenie, iż nie można ich pogodzić z ideami mechaniki kwantowej.

Pozwólcie, że zanim wyjaśnię ten problem, przedstawię krótkie podsumowanie interesujących nas w tym miejscu zagadnień mechaniki kwantowej. W teorii tej musimy brać pod uwagę możliwość, że daną cząstkę można zaobserwować w różnych miejscach z różnymi prawdopodobieństwami. Wszystkie te możliwości opisuje funkcja falowa. Przyjmuje ona duże wartości w miejscach, gdzie prawdopodobieństwo zaobserwowania cząstki jest duże, a małe – gdzie pojawienie się cząstki jest mało prawdopodobne (mówiąc dokładnie, prawdopodobieństwo to jest równe kwadratowi wartości funkcji). Co więcej, funkcje falowe o łagodnym, gładkim przebiegu – które spokojnie zmieniają się

w przestrzeni i czasie – mają mniejszą energię od funkcji zmieniających się w sposób gwałtowny.

Czas przejść do sedna problemu. Przyjmijmy, że mamy łagodną, gładką funkcję falową kwarka zawierającego czerwony ładunek koloru. Zastosujmy teraz na niewielkim obszarze naszą przykładową symetrię lokalną, zmieniając czerwony ładunek koloru na niebieski. Po tej zamianie w naszej funkcji falowej pojawiły się gwałtowne zmiany. Wewnątrz tego małego obszaru opisuje ona tylko niebieski kolor ładunku; poza tym obszarem opisuje wyłącznie ładunek czerwony. Zmieniliśmy zatem funkcję falową o niskiej energii – bez żadnych nagłych zmian wartości – w funkcję opisującą stan o wyższej energii, ponieważ jej wartość zmienia się teraz w sposób gwałtowny. Ta zmiana stanu bez wątpienia wpłynie na zachowanie opisywanego przez nas kwarka, ponieważ energia wywołuje wiele dających się zauważyć efektów. Na przykład zgodnie z drugim prawem Einsteina można określić energię kwarka, mierząc jego ciężar, ale przecież cała istota symetrii polega na tym, że nie powinna ona zmieniać zachowania obiektów, które przekształca[32]. Chcemy, żeby było to jedynie *formalne* rozróżnienie.

Aby więc uzyskać równania mające lokalną symetrię, musimy zmienić regułę, z której wynika, że gwałtowne zmiany w funkcji falowej muszą mieć dużą energię. Musimy przyjąć, że energia nie zależy jedynie od tempa zmian funkcji falowej; muszą istnieć jeszcze dodatkowe wyrazy korygujące. W tym miejscu ważne stają się pola gluonowe. Ów wyraz korygujący zawiera iloczyny różnych pól gluonowych (w przypadku QCD ośmiu) dla poszczególnych składników koloru funkcji falowych kwarka. Jeżeli wszystko zrobimy jak należy, to po wykonaniu przekształcenia z wykorzystaniem lokalnej symetrii zmieni się funkcja falowa kwarka, zmieni się też pole gluonowe, ale energia funkcji falowej – która obejmuje wyrazy korygujące – pozostanie taka sama. Nie ma w tym procesie żadnej niejasności: symetria lokalna wyraźnie mówi, co należy zrobić, krok po kroku.

Szczegóły tego rozwiązania bardzo trudno jest opisać słowami. To naprawdę „trudniej powiedzieć, niż zrobić” (że jeszcze raz

zacytuję poezję Heina) i jeżeli chcecie zobaczyć, jak to wszystko wygląda w rzeczywistości, razem z równaniami, będziecie musieli zajrzeć do artykułów naukowych i podręczników. Wymieniam kilka najbardziej przystępnych pozycji tego rodzaju[33]. Na szczęście nie trzeba wgryzać się w szczegóły rachunkowe, żeby zrozumieć płynący z nich wielki filozoficzny wniosek, który brzmi: W celu uzyskania symetrii lokalnej musimy wprowadzić pola gluonowe. I musimy ustalić, jak pola te oddziałują z kwarkami i ze sobą wzajemnie; właśnie tak. Okazuje się, iż *idea* – symetria lokalna – jest tak silna i restrykcyjna, że wymusza istnienie określonego zbioru równań. Innymi słowy, stosując taką ideę, otrzymujemy pewną propozycję rzeczywistości.

Propozycja rzeczywistości zawierającej gluony ładunku koloru obejmuje ideę lokalnej symetrii. Częścią przepisu na jej wizję świata są nowe składniki – pola gluonowe. Czy występują one w naszym świecie? Jak powiedzieliśmy, a nawet zobaczyliśmy na fotografiach – tak, one rzeczywiście istnieją. Okazuje się, że owa zrodzona z idei propozycja rzeczywistości jest naszą rzeczywistością.

26 Klasyczną już książką wprowadzającą w zagadnienie symetrii, napisaną przez wielkiego pioniera matematyki symetrii i człowieka o niezwykłej kulturze, jest *Symetria* Hermanna Weyla. Eugene Wigner w wielkim stylu wprowadził do współczesnej fizyki teorię grup i jego pełne głębokich przemyśleń eseje *Symmetries and Reflections* są z wielu względów interesujące.

27 Egzaminu nie będzie.

28 Kiedyś przeprowadziłem bardzo interesującą rozmowę na ten temat z samym Feynmanem. Wyznał mi, że początkowo miał nadzieję, iż uda mu się usunąć takie procesy próżniowe z teorii, i był niepocieszony, gdy okazało się, że nie da się tego zrobić bez szkody dla spójności teorii. Więcej o tej rozmowie powiem w rozdziale ósmym.

29 Wcześniej wspomniałem o istnieniu trzeciego zapachu kwarków – kwarka dziwnego, oznaczanego symbolem s od ang. strange. Istnieją jeszcze trzy dodatkowe zapachy: powabny (oznaczany symbolem c od ang. charmed), niski

(symbol b od ang. bottom) oraz wysoki (symbol t od ang. top). Są one jeszcze cięższe i mniej trwałe niż kwark s. Na razie pominiemy je w naszych rozważaniach.

30 Więcej gruków można znaleźć w książce *Gruki: wybór* Pieta Heina, a w przekładzie angielskim na stronie internetowej: http://www.chat.carleton.ca/~tcstewar/grooks/grooks.html.

31 Piet Hein, Czerwcowy wieczór. Gruk nastrojowy [w:] P. Hein, Gruki: wybór, przeł. Bogusława Sochańska, Instytut Wydawniczy „Świadectwo", Bydgoszcz 1999, s. 52 (przyp. tłum.).

32 Wspomniana wcześniej symetria z „pchnięciem" w szczególnej teorii względności zmienia energie cząstek, ale zmienia jednocześnie działanie wag, którymi mierzymy ich ciężar, tak że nie pojawia się żaden wykrywalny efekt wypadkowy. Nasza lokalna symetria ładunku koloru natomiast nie wpływa w żaden sposób na zwyczajne wagi (takie, jakie można znaleźć na przykład w sklepie spożywczym), ponieważ ich wypadkowy ładunek koloru jest zerowy. Zarejestrują one zatem zmianę ciężaru i nic na to nie możemy poradzić.

33 Ostrzegam, że szczegóły teorii kwantowej to nie jest lektura dla mięczaków. Gdybyście chcieli zagłębić się w tę tematykę, polecam na początek wspomnianą już książkę Feynmana *QED: osobliwa teoria światła i materii* oraz mój artykuł przeglądowy *Quantum Field Theory* napisany z okazji setnej rocznicy Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego, przedrukowany w książce *More Things in Heaven and Earth* pod redakcją Benjamina Bedersona. Artykuł ten jest również zamieszczony w internecie pod adresem frankwilczek.com. Przez pewien czas najlepszym podręcznikiem była książka *An Introduction to Quantum Field Theory* Michaela Peskina i Daniela Schroedera; niedawno ukazała się druga świetna pozycja tego rodzaju: *Quantum Field Theory* Marka Srednickiego. Napisana lekkim stylem książka *Quantum Field Theory in a Nutshell* Anthony'ego Zee porusza wiele niecodziennych aspektów związanych z tą tematyką. W końcu trzytomowa *Teoria pól kwantowych* Stevena Weinberga jest mistrzowskim dziełem czołowego uczonego, ale poza historycznym wstępem w pierwszym tomie lektura ta może się okazać bardzo trudna dla osób niezajmujących się zawodowo tą tematyką.

# Rozdział 8

# Siatka (trwałość eteru)

*Czym jest przestrzeń? Pustą sceną, na której fizyczny świat materii odgrywa swoją sztukę? Równoprawnym uczestnikiem, który stanowi tło i jednocześnie żyje własnym życiem? Czy może prawdziwą rzeczywistością, a materia – jedynie jej wtórnym przejawem? Śledząc historię nauki, przekonamy się, że poglądy na tę kwestię w przeszłości zmieniały się, czasami nawet radykalnie. Obecnie triumfy święci trzeci z przedstawionych poglądów. Tam, gdzie nasze oczy niczego nie widzą, umysły, analizując wyniki niezwykle precyzyjnych doświadczeń, odkrywają Siatkę będącą źródłem fizycznej rzeczywistości.*

Filozoficzne i naukowe idee mówiące o tym, z czego składa się świat, cały czas się zmieniają. W najlepszych dostępnych obecnie modelach świata jest wciąż wiele niewyjaśnionych kwestii i kilka poważnych zagadek. Nie ulega wątpliwości, że nie powiedzieliśmy jeszcze ostatniego słowa. Dużo jednak już wiemy – wystarczająco dużo, żeby dojść do zadziwiających wniosków, które nie są jedynie opisem niepowiązanych ze sobą faktów. Wkraczają one w sferę pytań – a w niektórych przypadkach udzielają nawet na nie odpowiedzi – które tradycyjnie uważano za domenę filozofii czy teologii.

Dla filozofii przyrody najważniejszą nauką wyciągniętą z QCD jest fakt, że przestrzeń, którą my postrzegamy jako pustą, jest w rzeczywistości niezwykle ważnym ośrodkiem – jego aktywność nadaje kształt światu. Inne odkrycia współczesnej fizyki potwierdzają

i rozszerzają tę prawdę. W dalszej części książki, gdy będziemy mówili o obecnych granicach nauki, przekonamy się, że pojęcie „pustej" przestrzeni, która jest w rzeczywistości bogatym, dynamicznym ośrodkiem, stanowi podstawę najlepszych pomysłów na uzyskanie unifikacji sił.

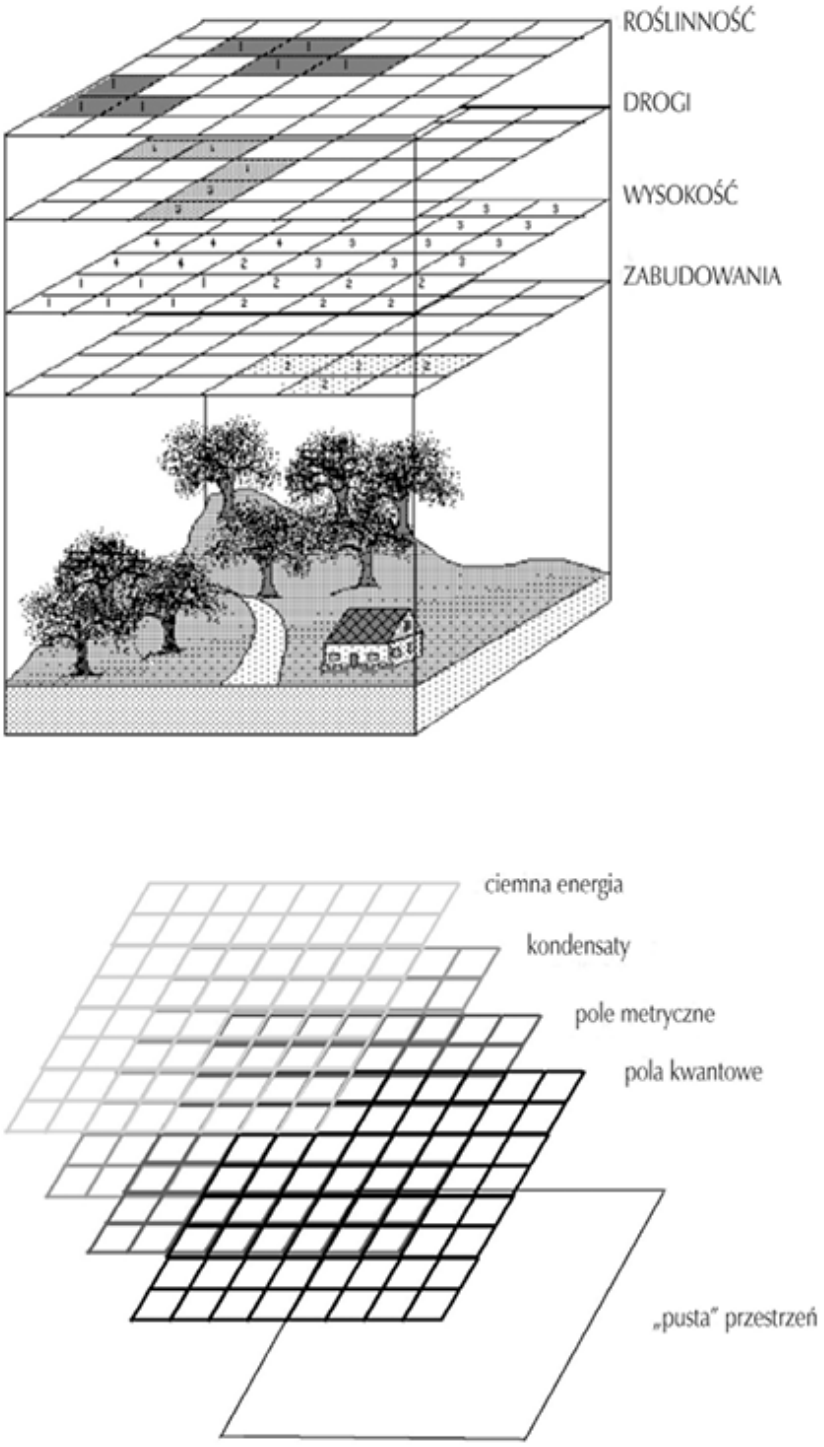
Z czego zatem zbudowany jest świat? Oto wieloaspektowa odpowiedź, jakiej udziela współczesna fizyka – pamiętajmy przy tym, że jak zawsze powinniśmy się spodziewać, iż w przyszłości dojdzie do jej rozszerzeń i korekt:

- Podstawowy składnik fizycznej rzeczywistości, z którego wszystko inne jest utworzone, wypełniają przestrzeń i czas.
- Każdy fragment wszystkich elementów czasoprzestrzeni ma takie same podstawowe własności.
- Podstawowy składnik rzeczywistości wprost kipi od aktywności kwantowej, która ma szczególne cechy: zachodzi samorzutnie i jest nieprzewidywalna. Poza tym każda próba zaobserwowania tej aktywności wiąże się z jej zaburzeniem.
- Fundamentalny komponent rzeczywistości zawiera również trwałe elementy materialne. Powodują one, że kosmos jest wielowarstwowym, wielokolorowym nadprzewodnikiem.
- Elementarny składnik rzeczywistości zawiera pole metryczne będące źródłem grawitacji i sztywności czasoprzestrzeni.
- Podstawowy komponent rzeczywistości ma swój ciężar i gęstość, taką jak Wszechświat.

Istnieją słowa oddające różne aspekty tej odpowiedzi. Wydaje się, że spośród starych pojęć najlepiej pasuje tu *eter*, ale na słowie tym ciąży piętno martwych idei, a poza tym nie obejmuje ono kilku nowych aspektów. *Czasoprzestrzeń* wydaje się logicznym określeniem opisującym coś, co musi się *tam* znajdować, wszędzie i zawsze, i ma w każdym miejscu takie same własności. Słowo to jest jednak obarczone jeszcze większym bagażem, między innymi bardzo mocno kojarzy się ono z pustką. Pierwsze trzy z wymienionych aspektów zawierają się w fizycznym terminie *pole kwantowe*, jednak pojęcie to nie obejmuje pozostałych trzech aspektów, a poza tym brzmi ono zbyt specjalistycznie i trudno byłoby się nim posługiwać w rozważaniach z zakresu filozofii przyrody.

Podstawowy składnik świata będę zatem określał słowem *Siatka*. Ma ono kilka zalet:

- Przywykliśmy do posługiwania się matematycznymi siatkami współrzędnych do przedstawiania warstw różnych struktur, tak jak pokazano na rysunku 8.1.
- Jak dobrze wiemy, urządzenia domowe, lampy i komputery zasilane są z sieci elektrycznej, oplatającej nasze domy niczym siatka. Fizyczny świat, który widzimy, czerpie swoją energię, mówiąc ogólnie, właśnie z Siatki.
- Celem jednego z prowadzonych obecnie projektów, częściowo wynikającego z konieczności zaspokojenia potrzeb rozwoju fizyki[34], jest połączenie wielu rozproszonych komputerów w jednostki funkcjonalne, których całkowitą moc obliczeniową można by wykorzystać w miarę potrzeb, sterując ich działaniem z dowolnego miejsca. Rozwiązanie to, znane jako przetwarzanie sieciowe, czasami również bywa nazywane „siatką komputerową". To bardzo modny i obiecujący trend w informatyce.
- Słowo *Siatka* jest krótkie.
- *Siatka* nie jest *Matriksem*. Bardzo mi przykro, ale kolejne części filmu przekreśliły tę kandydaturę. *Siatka* nie jest również *Borgiem* – ten bowiem jest zły.




Rysunek 8.1. Siatka – stara i nowa. a) Bardzo często posługujemy się siatką do opisania rozmieszczenia różnych elementów w przestrzeni. b) Siatka leżąca u podstaw naszego najlepszego modelu świata ma kilka aspektów. Jest obecna zawsze i wszędzie. Zwykła materia jest

drugorzędnym przejawem istnienia Siatki świadczącym o poziomie jej wzbudzenia.

# Krótka historia eteru

Dyskusję na temat pustki przestrzeni rozpoczęto w czasach poprzedzających narodziny współczesnej nauki – spory takie toczyli już filozofowie w starożytnej Grecji. Arystoteles napisał: „Natura nie znosi próżni", natomiast jego przeciwnicy, atomiści, tak mówili słowami poety Lukrecjusza:

> Natura, tak jak przez siebie istnieje, cała się składa
> Z dwojakiej rzeczy: są bowiem cząstki cielesne i próżnia; Te cząstki w próżni się mieszczą, w niej rozmaicie wędrują[35].

Ta stara spekulatywna dyskusja rozgorzała na nowo u zarania współczesnej nauki, podczas rewolucji naukowej XVII wieku. Kartezjusz zaproponował oparcie naukowego opisu świata na wielkościach, które nazywał jakościami pierwotnymi: rozmiarze (a zasadniczo kształcie) i ruchu. Zakładał, że materia nie ma żadnych innych cech. Wynika z tego ważna konsekwencja: jeden fragment materii może wywrzeć wpływ na inny jej element, jedynie gdy wejdzie z nim w kontakt; ponieważ kawałki materii nie mają żadnych innych własności oprócz rozmiaru i ruchu, mogą się nawzajem dowiedzieć o swoim istnieniu jedynie za pomocą dotyku. By więc na przykład opisać ruch planet, Kartezjusz musiał wprowadzić wypełniające przestrzeń „plenum" niewidzialnej materii. Kreślił obrazy skomplikowanych, pełnych wirów i fal mórz, na których unoszą się planety.

Izaak Newton ominął wszystkie te potencjalne komplikacje, formułując dokładne, działające równania matematyczne ruchu planet, w których posłużył się swoimi zasadami dynamiki i prawem grawitacji. Prawo grawitacji Newtona nie mieści się w obrazie świata przedstawionym przez Kartezjusza. Postuluje ono istnienie działania

na odległość zamiast wpływu w wyniku bezpośredniego kontaktu. Według prawa Newtona Słońce działa siłą grawitacyjną na Ziemię, mimo że nie jest z nią w bezpośrednim kontakcie. Chociaż równania te doskonale się sprawdziły, umożliwiły bowiem świetny, szczegółowy opis ruchu planet, Newton nie był zadowolony z idei działania na odległość:

> To, że jedno ciało może na odległość, przez próżnię, wywierać wpływ na drugie bez pośrednictwa czegokolwiek, co mogłoby przenieść ich siłę i działanie, jest w moich oczach tak wielkim absurdem, iż, jak mniemam, nie uwierzy w to nikt, kto w kwestiach filozoficznych ma przyzwoite rozeznanie.

Niemniej pozwolił, żeby jego równania mówiły same za siebie:

> Nie udało mi się odkryć na podstawie obserwowanych zjawisk przyczyny owych własności grawitacji i nie wysuwam żadnych hipotez; wszystko bowiem, co nie jest wywiedzione z obserwacji zjawisk, musi być zwane hipotezą, ta zaś, metafizyczna czy fizyczna, o właściwościach okultystycznych czy mechanicznych, nie może stać się częścią filozofii doświadczalnej.

Zwolennicy Newtona nie omieszkali oczywiście zauważyć, że jego system opróżnił przestrzeń. Mając mniej skrupułów, stali się bardziej newtonowscy niż sam Newton. Posłuchajmy Woltera:

> Francuz przybywający do Londynu przekonuje się, że filozofia, jak wszystko inne, jest tam całkowicie odmieniona. Przed wyjazdem jego świat wypełniało plenum, a tu dowiaduje się, iż wypełnia go próżnia.

Matematycy i fizycy, którzy używali praw Newtona na co dzień i nieodmiennie przekonywali się, że odnoszą one spektakularne sukcesy, z czasem oswoili się z ideą działania na odległość. Tak

sprawy wyglądały w zasadzie przez ponad 150 lat, aż do chwili, gdy James Clerk Maxwell postanowił połączyć w całość wiedzę na temat elektryczności i magnetyzmu i odkrył, że uzyskane przez niego równania są niespójne[36]. W roku 1864 zauważył, że można pozbyć się tej niespójności dzięki wprowadzeniu do równań dodatkowego wyrazu – czyli innymi słowy, zakładając istnienie nowego efektu fizycznego. Kilka lat wcześniej Michael Faraday odkrył, że zmieniające się w czasie pola magnetyczne powodują powstanie pól elektrycznych. Maxwell, aby naprawić równania, musiał założyć istnienie odwrotnego efektu: mianowicie przyjąć, że zmieniające się pola elektryczne powodują powstanie pól magnetycznych. Z tą poprawką pola zaczęły żyć własnym życiem. Zmieniające się pola elektryczne wytwarzają (zmieniające się) pola magnetyczne, które powodują powstanie zmieniających się pól elektrycznych, i tak dalej – powstaje samonapędzający się cykl.

Maxwell odkrył, że jego nowe równania – znane obecnie jako równania Maxwella – mają rozwiązania oparte wyłącznie na polach, które poruszają się w przestrzeni z prędkością światła. Dochodząc do głównego punktu swojej wielkiej syntezy, stwierdził, że te samonapędzające się zaburzenia pól elektrycznych i magnetycznych *są* światłem – wniosek ten wytrzymał próbę czasu. Dla Maxwella owe żyjące własnym życiem pola, które wypełniały całą przestrzeń, były namacalnym symbolem chwały Boga:

> Rozległe obszary międzyplanetarne i międzygwiazdowe nie będą już nigdy więcej uważane za jałowe regiony Wszechświata, których Stwórca nie zechciał wypełnić symbolami różnorodnego porządku swego królestwa. Przekonamy się, że są one pełne owego cudownego medium; tak pełne, że żadna ludzka moc nie jest w stanie usunąć go z najmniejszego wycinka Przestrzeni ani też doprowadzić do powstania jakiejkolwiek skazy w jego nieskończonej ciągłości.

Opinia Einsteina na temat eteru była złożona i zmieniała się w różnych momentach jego życia. Wydaje mi się również, że jest to zagadnienie nie do końca rozumiane, nawet przez jego biografów i historyków nauki (niewykluczone, że także przeze mnie). W swoim pierwszym artykule na temat szczególnej teorii względności[37] z 1905 roku, zatytułowanym *O elektrodynamice ciał w ruchu*, napisał:

> Okaże się, że wprowadzenie „światłonośnego eteru" jest niepotrzebne, ponieważ przedstawiony tutaj obraz nie wymaga obecności „całkowicie nieruchomej przestrzeni" o szczególnych własnościach ani przypisania wektora prędkości do punktu pustej przestrzeni, w której zachodzą procesy elektromagnetyczne.

To zdecydowane stwierdzenie Einsteina przez długi czas nie dawało mi spokoju. Pozwólcie, że wyjaśnię dlaczego. W 1905 roku problemem fizyków nie był brak teorii względności. Gnębił ich fakt, że istniały takie *dwie wzajemnie niespójne* teorie. Z jednej strony była teoria względności mechaniki, posługująca się równaniami Newtona. Z drugiej istniała teoria względności elektromagnetyzmu, wykorzystująca równania Maxwella.

Obydwie teorie względności dowiodły, że ich równania przejawiają symetrię „pchnięcia" – to znaczy, przyjmują taką samą postać, gdy doda się do wszystkiego taką samą, ogólną prędkość. Współczesnym językiem powiemy, że prawa fizyki (określone tymi równaniami) wyglądają tak samo dla dowolnych dwóch obserwatorów poruszających się względem siebie ze stałą prędkością. Aby jednak przejść od opisu świata pierwszego obserwatora do drugiego, musimy inaczej opisać położenia i czasy. Obserwator na pokładzie samolotu lecącego z Nowego Jorku do Chicago za kilka godzin opisze Chicago jako „odległość 0", natomiast dla obserwatora na powierzchni ziemi Chicago wciąż będzie się wówczas znajdowało „w odległości 800 kilometrów w kierunku zachodnim" (w przybliżeniu). Problem polegał na tym, że zmiana opisów wymagana przez teorię względności mechaniki była inna

od wymaganej przez elektromagnetyczną teorię względności. Zgodnie z tą pierwszą konieczne jest ponowne opisanie położeń w przestrzeni, ale nie czasów; natomiast według drugiej musimy na nowo opisać jedno i drugie, do tego w dosyć skomplikowany sposób, w którym przestrzeń i czas mieszają się ze sobą. (Do 1905 roku Hendrik Lorentz wyprowadził już równania elektromagnetycznej teorii względności, a Henri Poincaré zdążył je nawet udoskonalić; obecnie znane są jako transformacja Lorentza). Nowatorski pomysł Einsteina polegał na przyjęciu wyższości elektromagnetycznej teorii względności i określeniu, jakie wynikają z tego konsekwencje dla pozostałych obszarów fizyki.

Okazało się więc, że to szacowna newtonowska teoria mechaniki, a nie niedawno sformułowana teoria elektromagnetyzmu, wymaga modyfikacji. Ustąpić musiała teoria oparta na cząstkach poruszających się w pustej przestrzeni, a nie ta, która zakłada istnienie ciągłych pól wypełniających przestrzeń. Szczególna teoria względności nie wprowadziła żadnych zmian do równań pola Maxwella; przeciwnie – równania te stały się jej podstawą. W dalszym ciągu pozostały w niej owe wypełniające przestrzeń, potencjalnie samonapędzające się pola elektryczne i magnetyczne, które wprawiły Maxwella w taki zachwyt. Co więcej, idee szczególnej teorii względności niemal *wymagają* istnienia wypełniających przestrzeń pól i w tym sensie wyjaśniają, dlaczego one istnieją – za chwilę powiemy na ten temat więcej.

Dlaczego więc Einstein z takim zdecydowaniem wyraził odmienną opinię? To prawda, że podważył stare idee na temat eteru w mechanice, ośrodka wypełnionego cząstkami zachowującymi się zgodnie z prawami Newtona – tak naprawdę podważył wszystkie te prawa. Jego teoria nie wyeliminowała jednak pól wypełniających przestrzeń, a nawet umocniła ich znaczenie. Lepiej by było, gdyby powiedział (tak mi się kiedyś wydawało), że idea eteru wyglądającego inaczej dla poruszających się obserwatorów jest błędna, ale już zmodyfikowany eter, który wygląda tak samo dla obserwatorów poruszających się względem siebie ze stałą prędkością, jest naturalną scenerią dla szczególnej teorii względności.

W roku 1905, gdy pracował nad szczególną teorią względności, Einstein rozmyślał również nad problemem, który później stał się znany jako kwantowa natura światła. Kilka lat wcześniej, w roku 1899, Max Planck wysunął pierwszą ideę teorii, która ostatecznie stanie się mechaniką kwantową. Zasugerował, że atomy mogą wymieniać się energią z polami elektromagnetycznymi – to znaczy, emitować i absorbować promieniowanie elektromagnetyczne, takie jak światło – jedynie w dyskretnych wielkościach, czyli w kwantach. Dzięki wykorzystaniu tej idei udało mu się wyjaśnić pewne zaobserwowane w doświadczeniach fakty dotyczące promieniowania ciała doskonale czarnego. (Mówiąc bardzo ogólnie, chodzi o to, jak kolor gorącego ciała, na przykład rozgrzanego pogrzebacza czy świecącej gwiazdy, zależy od temperatury. Mówiąc dokładniej, ale wciąż w dużym przybliżeniu, rozgrzane ciało emituje promieniowanie w zakresie wielu barw z różnym natężeniem. Należało więc opisać to całe spektrum natężeń i wyjaśnić, jak zmienia się ono z temperaturą). Pomysł Plancka sprawdził się w praktyce, ale nie był satysfakcjonujący z punktu widzenia teorii fizycznej. Przytwierdzono go po prostu do innych praw fizyki i nie był on czymś, co by z nich wynikało. Tak naprawdę to Einstein (a nie Planck) uświadomił sobie, że idea Plancka jest *niezgodna* z owymi prawami.

Innymi słowy, idea Plancka stanowiła kolejny przykład rozwiązania – podobnie jak pierwotny model kwarkowy czy partony – które sprawdza się w praktyce, ale nie w teorii. Nie zdobyłaby ona uznania na Uniwersytecie Chicagowskim i nie zdobyła go u Einsteina. Einstein był jednak pod wrażeniem przydatności tego pomysłu w wyjaśnianiu danych doświadczalnych. Rozwinął go więc w nowym kierunku i wysunął hipotezę, że nie tylko atomy emitują i absorbują światło (i ogólnie, promieniowanie elektromagnetyczne) w dyskretnych jednostkach energii, ale że również samo światło występuje w takich jednostkach i przemieszczając się, niesie ze sobą dyskretne wielkości pędu. Dzięki przyjęciu takiego rozszerzenia Einsteinowi udało się wyjaśnić kolejne fakty, a nawet przewidzieć kilka nowych – na przykład efekt fotoelektryczny, najważniejsze dokonanie, za które otrzymał w 1921 roku Nagrodę Nobla. W swoim umyśle Einstein przeciął węzeł gordyjski: idea Plancka jest niezgodna z istniejącymi

prawami fizyki, a mimo to działa – zatem to owe prawa muszą być błędne!

A jeżeli światło przemieszcza się w paczkach energii i pędu, czyż nie byłoby naturalne, gdybyśmy przyjęli, że te paczki – i samo światło – są cząstkami elektromagnetyzmu? Jak się przekonamy, pola są wygodnym pojęciem, ale Einstein nigdy nie przedkładał wygody nad zgodność z zasadami. Podejrzewam, że mając to wszystko na uwadze, spojrzał z niecodziennej perspektywy na nauki płynące ze szczególnej teorii względności. Dla niego idea wypełniającego przestrzeń bytu, który wygląda tak samo, gdy poruszamy się względem niego ze skończoną prędkością (jak wynika ze szczególnej teorii względności, tak właśnie musi zachowywać się „światłonośny eter"), była sprzeczna z intuicją i tym samym podejrzana. Taki punkt widzenia, podający w wątpliwość wyjaśniającą światło elektromagnetyczną teorię pola Maxwella, zgadzał się z wnioskami, jakie Einstein wyciągnął z prac Plancka i z własnych dokonań w zakresie promieniowania ciała doskonale czarnego i efektu fotoelektrycznego. Sądził, że taki rozwój wypadków – eter stał się sprzeczny z intuicją i, jak się zdawało, przyjmuje fizyczną postać jedynie w formie paczek energii i pędu – silnie przemawia za porzuceniem pól i powrotem do cząstek.

W czasie wykładu wygłoszonego w 1909 roku snuł takie rozważania:

> Tak czy inaczej, najbardziej naturalna wydaje mi się koncepcja, że elektromagnetyczne fale światła występują jedynie w punktach osobliwych, podobnie do pól elektrostatycznych w teorii elektronu. Nie można wykluczyć, że teoria taka pozwalałaby przyjąć, iż cała energia pola elektromagnetycznego jest umiejscowiona w owych punktach, podobnie jak w starej teorii działania na odległość. Wyobrażam sobie, że każdy taki punkt osobliwy otoczony jest polem o charakterze w zasadzie takim samym jak fala płaska, której amplituda maleje wraz z odległością między tymi punktami. Jeżeli wiele takich osobliwości znajdzie się

> w odległościach niewielkich w porównaniu z rozmiarami pola pojedynczego punktu osobliwego, pola ich nałożą się na siebie i utworzą w sumie oscylujące pole, jedynie nieznacznie różniące się od pola występującego w naszej obecnej elektromagnetycznej teorii światła.

Innymi słowy, około roku 1909 – a nawet, jak podejrzewam, w 1905 roku – Einstein wcale *nie* uważał, że równania Maxwella są obrazem głębszej natury światła. Nie był przekonany, że pola naprawdę żyją własnym życiem; podejrzewał, że są one efektem istnienia „punktów osobliwych". Nie wierzył, że pola rzeczywiście wypełniają przestrzeń – zakładał, że występują skoncentrowane w pakietach w pobliżu punktów osobliwych. Idee te łączyły się oczywiście bardzo ściśle z wyciągniętym przez niego wnioskiem, że światło występuje w dyskretnych pakietach: dzisiejszych *fotonach*.

Newton żywił obawy co do naturalnych konsekwencji swojej teorii – tego, że opróżnia ona przestrzeń. Podobnie Einstein nie był przekonany do naturalnych wniosków wypływających z jego teorii – do tego, że zapełnia przestrzeń. Tak samo jak Kolumb, gdy odkrył Nowy Świat, szukając innej drogi do Starego, tak badacze, którzy niespodziewanie odkrywają nowe kontynenty idei, często nie potrafią pogodzić się z tym, co znajdują. Dalej uporczywie rozglądają się za tym, czego szukali na samym początku.

Około roku 1920, po opracowaniu ogólnej teorii względności, stanowisko Einsteina zmieniło się: „Z bardziej uważnej analizy wynika jednak, że szczególna teoria względności nie wymaga, abyśmy porzucili eter". Rzeczywiście, ogólna teoria względności jest w dużym stopniu „eteryczną" (to znaczy, opartą na eterze) teorią grawitacji. (Opinię samego Einsteina na ten temat zachowam na razie do późniejszego wykorzystania w dalszej części rozdziału). Mimo to Einstein nigdy nie zarzucił prób pozbycia się elektromagnetycznego eteru:

> Jeżeli popatrzymy na pole grawitacyjne i pole elektromagnetyczne z punktu widzenia hipotezy eteru, zauważymy istotną między nimi różnicę. Przestrzeń, ani nawet żaden jej fragment, nie może istnieć bez potencjałów grawitacyjnych – one bowiem nadają przestrzeni jej metryczne właściwości, bez których nie można jej sobie w ogóle wyobrazić. Istnienie pola grawitacyjnego jest nierozdzielnie związane z istnieniem przestrzeni. *Z drugiej strony bez trudu można sobie wyobrazić fragment przestrzeni bez pola elektromagnetycznego…*[38]

Około roku 1982 odbyłem w Santa Barbara pamiętną rozmowę z Feynmanem. Feynman zwykle, przynajmniej w towarzystwie ludzi, których za dobrze nie znał, działał na wysokich obrotach – funkcjonował w trybie dawania przedstawienia. Jednak po niemal całym dniu takich brawurowych występów bywał już lekko zmęczony i zaczynał sobie odpuszczać. Przed kolacją odbyłem z nim sam na sam kilkugodzinną dyskusję o szeroko rozumianej fizyce. Rozmowa w sposób nieunikniony zeszła na temat najbardziej tajemniczego aspektu naszego modelu świata – zarówno w 1982 roku, jak i obecnie – zagadnienia stałej kosmologicznej. (Jest ona zasadniczo gęstością pustej przestrzeni. Pozwólcie, że wybiegając nieco w przód, wspomnę jedynie, iż wielką zagadką współczesnej fizyki jest pytanie, dlaczego pusta przestrzeń tak niewiele waży, mimo że tak dużo zawiera).

– Czy nie martwi cię, że grawitacja jak gdyby całkowicie ignoruje wszystko, czego dowiedzieliśmy się na temat złożoności próżni? – zapytałem Feynmana.

– Kiedyś sądziłem, że udało mi się to wyjaśnić – odparł natychmiast.

A potem się zamyślił. Zwykle w czasie rozmowy patrzył rozmówcy prosto w oczy i mówił wolno, ale pięknie, nieprzerwanym strumieniem okrągłych zdań, a nawet całych ustępów. Teraz jednak wpatrywał się w pustą przestrzeń; zamilkł i wydawało się, że na chwilę przeniósł się gdzieś w myślach.

Gdy doszedł ponownie do siebie, wyjaśnił, że jest rozczarowany wynikami swoich prac nad elektrodynamiką kwantową. Było to zaskakujące stwierdzenie w jego ustach, ponieważ to właśnie dzięki tym znakomitym pracom cały świat poznał diagramy Feynmana, a także wiele innych metod, którymi wciąż się posługujemy do przeprowadzania trudnych obliczeń z zakresu kwantowej teorii pola. To również za to osiągnięcie odebrał przecież Nagrodę Nobla.

Wyznał mi, że gdy uświadomił sobie, iż jego teoria fotonów i elektronów jest matematycznie równoważna zwykłej teorii, jego największe nadzieje legły w gruzach. Myślał, że dzięki sformułowaniu swojej teorii bezpośrednio za pomocą trajektorii cząstek w czasoprzestrzeni – czyli diagramów Feynmana – uda mu się uniknąć stosowania pojęcia pola i stworzyć coś zupełnie nowego. Przez chwilę sądził, że mu się to udało.

Dlaczego chciał się pozbyć pól?

– Miałem taki slogan – powiedział. Podnosząc głos, zaintonował z brooklyńskim akcentem:

> Próżnia nic nie waży – pełna dramatyzmu pauza – *ponieważ niczego tam nie ma!*

Po czym uśmiechnął się, wyraźnie z siebie zadowolony, choć wciąż przygnębiony. Jego rewolucja nie potoczyła się tak, jak sobie zaplanował, ale doprawdy, warto było spróbować.

## Szczególna teoria względności a Siatka

Z historycznego punktu widzenia szczególna teoria względności powstała dzięki badaniom nad elektrycznością i magnetyzmem, których kulminacją była maxwellowska teoria pola. Wynika z tego, że szczególna teoria względności została stworzona na gruncie opisu świata opartego na pojęciu bytów – pól elektrycznych

i magnetycznych – wypełniających całą przestrzeń. Taki opis różnił się radykalnie od modelu świata zainspirowanego newtonowską mechaniką klasyczną i teorią grawitacji, który odgrywał najważniejszą rolę we wcześniejszych rozważaniach naukowych. Model świata Newtona opierał się na cząstkach oddziałujących ze sobą na odległość poprzez pustą przestrzeń.

Szczególna teoria względności wykracza jednak poza elektromagnetyzm. Jej istotą jest założenie istnienia symetrii: prawa fizyki będą miały taką samą postać, nawet jeżeli przyspieszymy wszystko, co się w nich pojawia, o taką samą, stałą prędkość. Jest to postulat natury ogólnej, sięgający daleko poza swoje elektromagnetyczne korzenie. Symetria „pchnięcia" szczególnej teorii względności stosuje się do *wszystkich* praw fizyki. Jak już wspomnieliśmy, Einstein musiał zmienić newtonowskie prawa mechaniki, tak by miały taką samą symetrię jak elektromagnetyzm.

Atrament nie zdążył jeszcze dobrze wyschnąć na kartach szczególnej teorii względności, gdy Einstein zabrał się już do poszukiwania sposobu włączenia do swojego nowego opisu również grawitacji. Był to początek dziesięcioletnich badań, o których później sam tak powiedział:

> (…) lata poszukiwania w ciemnościach prawdy, którą się czuje, ale której nie można wyrazić; potężne pragnienie, poczucie na zmianę pewności siebie i zwątpienia, aż do przełomu, po którym wszystko staje się jasne i zrozumiałe – uczucia te znane są tylko tym, którzy sami ich doświadczyli[39].

W końcu opracował teorię grawitacji opartą na *polach* – ogólną teorię względności. W dalszej części rozdziału będziemy jeszcze dużo mówili na temat tej teorii. Podobne badania prowadziło również kilku innych mądrych ludzi – między innymi Poincaré, wielki niemiecki matematyk Hermann Minkowski i fiński fizyk Gunnar Nordström – próbowali oni skonstruować teorie grawitacji zgodne z pojęciami szczególnej teorii względności. Wszyscy doszli do jakiejś postaci teorii pola.

Istnieje bardzo dobry, ogólny powód, dla którego należy oczekiwać, iż wszystkie teorie fizyczne spójne ze szczególną teorią względności muszą być teoriami pola. Oto on:

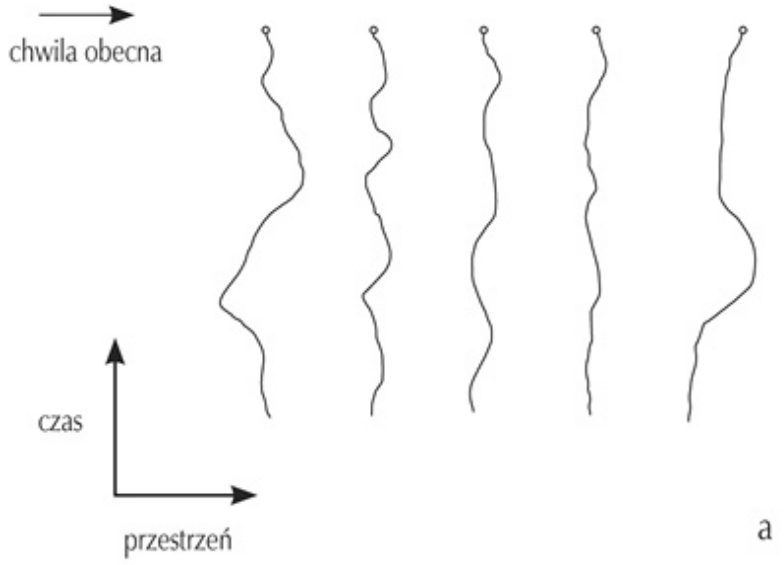
Ważnym wnioskiem szczególnej teorii względności jest istnienie ograniczenia na maksymalną prędkość: jest ona równa prędkości światła, zwykle oznaczanej literą *c*. Wpływ wywierany przez jedną cząstkę na drugą nie może się przenosić szybciej niż z taką właśnie prędkością. Newtonowskie prawo grawitacji, zgodnie z którym grawitacja działa na odległe ciało z siłą odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości *dokładnie teraz*, nie przestrzega tego ograniczenia, nie jest więc zgodne ze szczególną teorią względności. Co więcej, samo pojęcie „dokładnie teraz" staje się problematyczne. Zdarzenia, które dla obserwatora znajdującego się w spoczynku są jednoczesne, dla obserwatora poruszającego się ze stałą prędkością już takie nie będą. Odrzucenie pojęcia obowiązującego wszędzie „teraz" było, zdaniem samego Einsteina, zdecydowanie najtrudniejszym krokiem w opracowaniu szczególnej teorii względności:

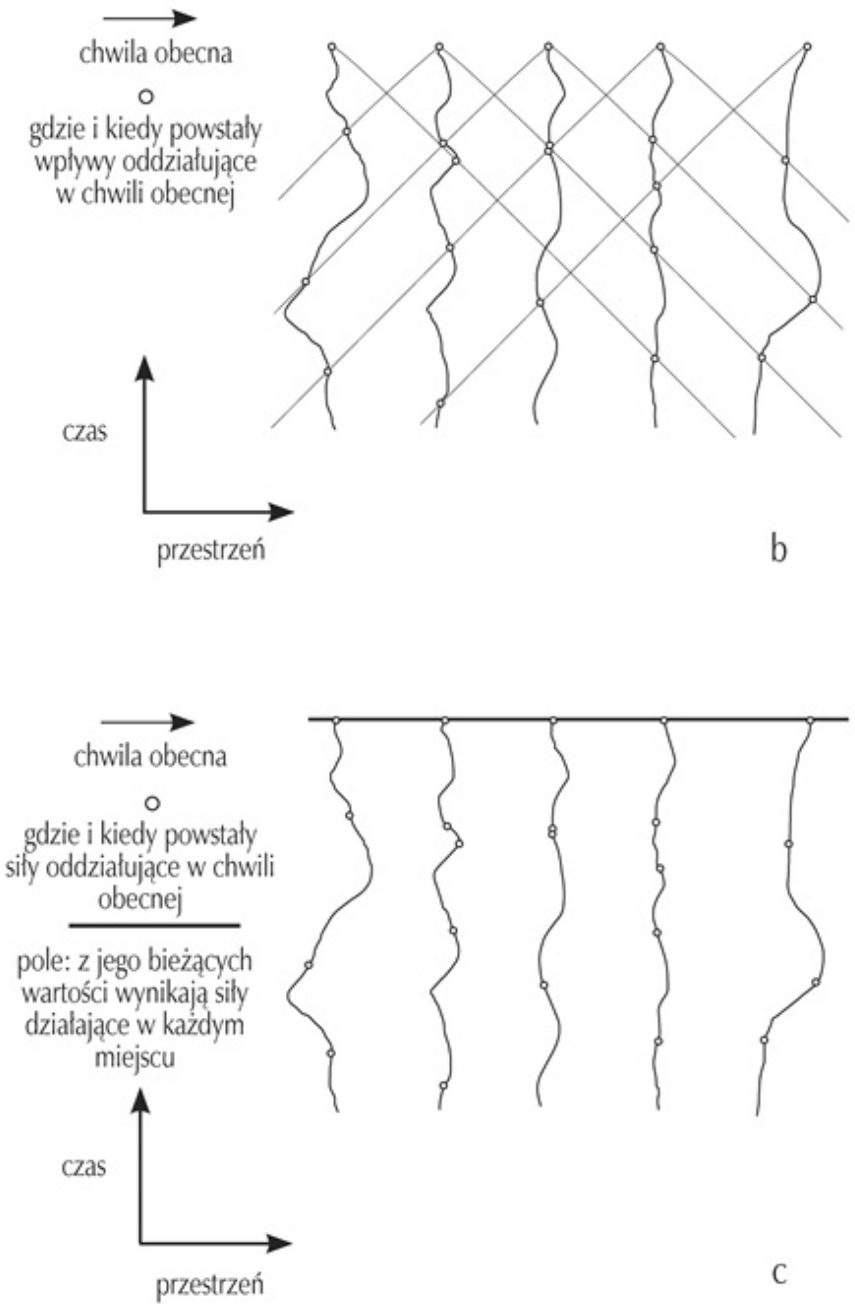
> (…) wszelkie próby satysfakcjonującego wyjaśnienia tego paradoksu były skazane na niepowodzenie, dopóki nie uzmysłowiono sobie, że w podświadomości zakorzeniony jest aksjomat bezwzględnego charakteru czasu bądź równoczesności. Rozpoznanie tego aksjomatu i jego arbitralności praktycznie oznacza rozwiązanie problemu[40].

To niezwykle ciekawa opowieść, ale przedstawiono ją już w dziesiątkach książek popularnonaukowych poświęconych teorii względności, nie będziemy więc się w nią dalej zagłębiać. Dla naszych celów ważne jest jedynie to, że istnieje ograniczenie na maksymalną prędkość i jest nim prędkość światła, *c*.

Popatrzmy teraz na rysunek 8.2. Na rysunku 8.2a przedstawiono linie świata kilku cząstek. Na osi poziomej zaznaczono ich położenie w przestrzeni, a na pionowej pokazano czas. W miarę upływu czasu zmienia się położenie cząstek. Linię świata danej cząstki wytyczają

jej położenia w kolejnych momentach. Oczywiście tak naprawdę powinniśmy przedstawić trzy wymiary przestrzenne, lecz nawet dwa trudno zmieścić na płaskiej kartce. Na szczęście jeden wymiar wystarcza, by wyjaśnić, o co nam chodzi. Na rysunku 8.2b widzimy, że jeżeli oddziaływania przenoszą się ze skończoną prędkością, to wpływ, jaki (powiedzmy) cząstka A wywiera na B, zależy od tego, gdzie A była w przeszłości. Aby zatem wyznaczyć całkowitą siłę działającą na daną cząstkę, musimy zsumować wpływy wywierane przez wszystkie pozostałe cząstki, które docierają z różnych wcześniejszych czasów. Uzyskujemy w ten sposób skomplikowany obraz, co widać na rysunku 8.2b. Zgodnie z innym podejściem, pokazanym na rysunku 8.2c, możemy zapomnieć o śledzeniu wszystkich przeszłych położeń poszczególnych cząstek i zamiast tego skupić się na wypadkowych wpływach. Innymi słowy, śledzimy zmiany *pola* odpowiadające wypadkowemu wpływowi.






Rysunek 8.2. Szczególna teoria względności prowadzi do pól. a) Linie świata kilku cząstek pokazujące, jak ich położenie (oś pozioma) zmienia się z upływem czasu (oś pionowa). b) Jeżeli istnieje ograniczenie na maksymalną prędkość, to siła działająca na dowolną cząstkę będzie zależała od tego, gdzie w przeszłości znajdowały się pozostałe cząstki. Na rysunku zaznaczono „linie wpływu" odpowiadające rozchodzeniu się oddziaływań z największą możliwą prędkością: *c*. c) Aby wyznaczyć

wypadkową siłę, możemy albo śledzić położenie wszystkich cząstek w przeszłości, albo skupić się jedynie na ich sumarycznym wpływie. Pierwszy sposób odpowiada teorii cząstek, drugi – potencjalnie znacznie prostszy – teorii pola.

To przejście od opisu za pomocą cząstek do wykorzystania pól będzie szczególnie owocne, jeżeli pola uda się opisać prostymi równaniami pozwalającymi wyznaczyć przyszłe ich wartości na podstawie wartości bieżących, bez konieczności uwzględniania wartości, jakie przyjmowały one w przeszłości. Okazuje się, że własności takie ma zarówno teoria elektromagnetyzmu Maxwella, jak i ogólna teoria względności, a także QCD. Najwyraźniej Natura wykorzystała okazję do względnie[41] prostego opisu zjawisk za pomocą pól.

## Gluony a Siatka

Einstein i Feynman znali rozumowanie, z którego wynika nieuchronność opisu za pomocą pól w fizyce podstawowej[42]. Mimo to, jak widzieliśmy, obaj byli gotowi – a nawet chętni – powrócić do opisu świata za pomocą cząstek.

Fakt, że ci dwaj wielcy fizycy w różnych czasach i z różnych powodów mogli kwestionować istnienie pól wypełniających całą przestrzeń (kluczowy aspekt Siatki), pokazuje, iż argumenty przemawiające za ich istnieniem nawet w drugiej połowie XX wieku nie były całkowicie przekonujące. Można było mieć wątpliwości, ponieważ znaleziono bardzo niewiele twardych dowodów przemawiających za tym, że pola żyją własnym życiem. Omawiając rysunek 8.2, dowodziłem, że pola są *wygodnym* sposobem opisu. To zupełnie co innego niż stwierdzenie, że są one *nieodzownym składnikiem rzeczywistości*.

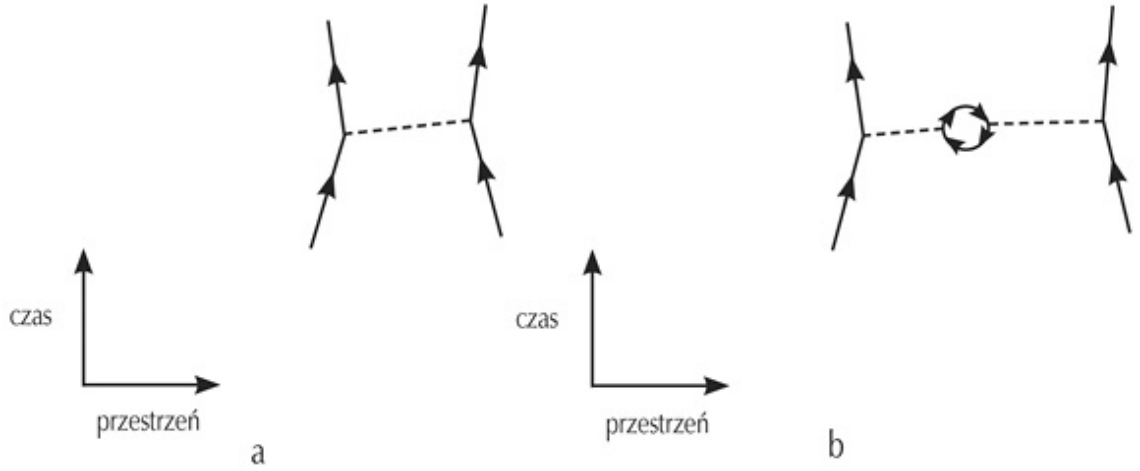
Nie jestem pewien, czy Einstein kiedykolwiek był przekonany o istnieniu elektromagnetycznego eteru. Jedna z jego najsilniejszych cech jako fizyka teoretyka mogła też okazać się słabością – mam

na myśli upór. Na pewno przydał mu się, gdy nieustępliwie starał się rozwiązać sprzeczności między dwiema teoriami względności – mechaniczną i elektromagnetyczną – faworyzując tę ostatnią; upór przydał mu się również, gdy postanowił poważnie potraktować idee Plancka i zastosować je szerzej mimo sprzeczności z istniejącą teorią; a także wtedy, gdy zmagał się z trudnościami i nieznaną matematyką potrzebną w ogólnej teorii względności. Z drugiej jednak strony to przez upór po 1924 roku nie wziął udziału w niezwykle owocnym rozwoju współczesnej teorii kwantowej, gdy dobrze zakorzeniły się w niej niepewność i indeterminizm, i to upór właśnie nie pozwolił mu przyjąć do wiadomości jednej z najbardziej niezwykłych konsekwencji jego własnej ogólnej teorii względności – istnienia czarnych dziur.

Problemy Einsteina z pogodzeniem kwantowej natury fotonów z wypełniającymi przestrzeń w sposób ciągły polami, które od czasów Maxwella z dużymi sukcesami wykorzystuje się do opisu światła, pokonano, stosując współczesne pojęcie pól kwantowych. Pola kwantowe wypełniają całą przestrzeń, a kwantowe pola elektryczne i magnetyczne zachowują się zgodnie z równaniami Maxwella[43]. Mimo to, jeżeli przyjrzymy się tym polom, zauważymy, że ich energia skupiona jest w oddzielnych pakietach: fotonach. W następnym rozdziale powiem znacznie więcej na temat tych dziwnych, ale sprawdzających się pojęć leżących u podstaw kwantowej teorii pola.

Jeśli zaś chodzi o Feynmana, to poddał się, gdy pracując nad równaniami matematycznymi swojej wersji elektrodynamiki kwantowej, odkrył, że pola – wprowadzone jedynie dla wygody – zaczynają żyć własnym życiem. Powiedział mi, że stracił serce do swojego pomysłu opróżnienia przestrzeni, gdy przekonał się, iż zarówno równania matematyczne, jak i dane doświadczalne wymagają istnienia swoistej modyfikacji *polaryzującej próżnię* w procesach elektromagnetycznych przedstawionych – za pomocą diagramów Feynmana – na rysunku 8.3. Rysunek 8.3a jest ciekawym sposobem podsumowania tych samych zjawisk fizycznych, które śledziliśmy na rysunku 8.2. W tym przypadku wpływ jednej cząstki

na drugą przenoszony jest przez foton. Na rysunku 8.3b pojawia się coś nowego. Pole elektromagnetyczne ulega modyfikacji w wyniku oddziaływania z samoistną fluktuacją pola elektronowego – czyli innymi słowy, w wyniku oddziaływania z wirtualną parą elektron-pozyton. Opisując ten proces, trzeba się bardzo natrudzić, by uniknąć odwołań do wypełniających przestrzeń pól.




Rysunek 8.3. Siła działająca między cząstkami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym. Część *a* podsumowuje, używając języka diagramów Feynmana, zjawiska fizyczne przedstawione na rysunku 8.2. Na tym poziomie pola elektryczne i magnetyczne są określone równaniami Maxwella, ale można je również wywieść z oddziaływań naładowanych cząstek. Pola są wygodne, ale niewykluczone, że moglibyśmy się bez nich obyć. W części *b* pojawia się coś nowego. Oprócz działającej siły pola elektromagnetyczne ulegają wpływowi samoistnego zdarzenia (pojawienia się wirtualnej pary cząstka-antycząstka) w polu elektronowym.

Pojawienie się wirtualnej pary cząstek jest wynikiem samoistnego zdarzenia w polu elektronowym. Może do niego dojść wszędzie. A gdy już do niego dochodzi, pole elektromagnetyczne odczuwa wpływ tego zjawiska. Te dwa zjawiska – fluktuacje zachodzące wszędzie i w każdym miejscu wywierające wpływ – pojawiają się zupełnie jednoznacznie w wyrażeniach matematycznych towarzyszących rysunkowi 8.3b. Prowadzą do skomplikowanych, niewielkich, ale bardzo charakterystycznych poprawek do siły wyznaczonej z równań Maxwella. Poprawność tych modyfikacji

potwierdzono z dużą dokładnością w precyzyjnie przeprowadzonych doświadczeniach.

W QED polaryzacja próżni jest niewielkim efektem, zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym, natomiast w QCD urasta do rangi bardzo ważnego zjawiska. W rozdziale szóstym dowiedzieliśmy się, że prowadzi ona do swobody asymptotycznej i tym samym umożliwia podanie poprawnego opisu zjawiska powstawania dżetów. W następnym rozdziale zobaczymy, w jaki sposób QCD można wykorzystać do wyznaczenia masy protonów i innych hadronów. Ewolucja nie przystosowała naszych oczu do obserwacji zjawisk krótkotrwałych ($10^{-24}$ sekundy) zachodzących na niewielkich odległościach ($10^{-14}$ centymetra) – choć tam właśnie wszystko się dzieje. Możemy jednak „zajrzeć" do przeprowadzonych za pomocą komputerów obliczeń i przekonać się, co knują kwarki i pola gluonowe. Dla istot obdarzonych oczami bardziej bystrymi niż my przestrzeń wyglądałaby jak ultrastroboskopowa lampa magmowa o niezwykle małych rozmiarach – jak to pokazano na rycinie nr 4 kolorowej wkładki. Istoty takie nie mogłyby zrozumieć, dlaczego ulegamy złudzeniu istnienia pustej przestrzeni.

## Siatka materialna

Oprócz fluktuacji pól kwantowych przestrzeń wypełnia kilka warstw czegoś bardziej trwałego, materialnego. Są to etery bliższe oryginalnemu pomysłowi Arystotelesa i Kartezjusza – substancje wypełniające przestrzeń. W niektórych przypadkach możemy nawet określić, z czego są one zbudowane, i wytworzyć niewielkie ich próbki. Osoby parające się fizyką nazywają zwykle te materialne etery *kondensatami*. Można by powiedzieć, że ulegają one (żeby nie było wątpliwości – etery, nie osoby) samoistnej kondensacji z pustej przestrzeni, tak jak poranna rosa czy wszechobecna mgła mogą się wytrącić z wilgotnego, niewidocznego powietrza.

Najlepiej poznane kondensaty składają się z par kwark-antykwark. Mówimy tutaj o rzeczywistych cząstkach, a nie efemerycznych, wirtualnych parach, które samorzutnie pojawiają się i znikają. Zwyczajowa nazwa tej wypełniającej przestrzeń mgły kwarków i antykwarków brzmi *kondensat złamania symetrii chiralnej*, ale proponuję, żebyśmy używali nazwy mówiącej, czym ów kondensat jest: $Q\bar{Q}$, czyli kwark-antykwark.

W przypadku $Q\bar{Q}$, a także pozostałych kondensatów, dwa podstawowe pytania brzmią:

- Dlaczego uważamy, że on istnieje?
- Jak możemy sprawdzić, że rzeczywiście w danym miejscu występuje?

Jedynie w przypadku kondensatu $Q\bar{Q}$ udało się nam uzyskać dobre odpowiedzi na obydwa pytania.

Kondensat $Q\bar{Q}$ powstaje, ponieważ doskonale pusta przestrzeń jest niestabilna. Przypuśćmy, że opróżniliśmy przestrzeń, usuwając z niej kondensaty par kwark-antykwark – łatwiej zrobić to w wyobraźni za pomocą odpowiednich równań i komputerów niż w trakcie doświadczenia w laboratorium. Po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń okazuje się, że pary kwark-antykwark mają ujemną energię całkowitą. Koszt energetyczny ($mc^2$) wytworzenia tych cząstek jest pokrywany z nawiązką przez energię, która się wyzwala pod wpływem uwolnienia działających między nimi sił przyciągających. Siły te powodują połączenie się ich w małe cząsteczki. (Takie cząsteczki kwark-antykwark nazywa się mezonami σ). Doskonale pusta przestrzeń jest zatem niezwykle wybuchowa, w każdej chwili może gwałtownie z siebie wyrzucić rzeczywiste cząsteczki kwark-antykwark.

Reakcje chemiczne zaczynają się zwykle od jakichś składników wejściowych *A*, *B* i w efekcie prowadzą do powstania produktów *C*, *D*; piszemy wtedy

$$A + B \longrightarrow C + D$$

a jeżeli dochodzi do uwolnienia energii:

$$A + B \longrightarrow C + D + \text{energia}$$

(To jest równanie chemiczne wybuchu).
W takiej notacji nasza reakcja wygląda następująco:

$$[\text{nic}] \longrightarrow \text{kwark} + \text{antykwark} + \text{energia}$$

Nie potrzeba żadnych składników początkowych (poza pustą przestrzenią)! Na szczęście, taki wybuch sam się ogranicza. Powstające pary odpychają się wzajemnie, w miarę wzrostu ich gęstości coraz trudniejsze staje się więc zmieszczenie kolejnych nowych par. Całkowity koszt wytworzenia nowej pary obciążony jest dodatkowym wydatkiem energetycznym na oddziaływanie z cząsteczkami, które powstały wcześniej. Gdy dochodzi do sytuacji, w której proces ten przestaje być zyskowny energetycznie, wytwarzanie par ustaje. Ostatecznie uzyskujemy stan stabilny, w którym przestrzeń wypełnia kondensat $Q\bar{Q}$.

Ciekawa opowieść – pewnie się ze mną zgodzicie. Skąd jednak wiemy, że jest prawdziwa?

Pierwszą odpowiedzią jest fakt, że proces taki stanowi matematyczną konsekwencję równań QCD, które możemy zweryfikować na wiele innych sposobów. Chociaż jednak odpowiedź ta jest całkowicie *logiczna* (jak już mówiliśmy, równania sprawdzono bardzo szczegółowo i przekonująco), z punktu widzenia nauki nie jest to wymarzone wytłumaczenie. Chcielibyśmy, aby z równań wynikało coś, czego efekty można zaobserwować w świecie fizycznym.

Druga odpowiedź wynika z tego, że możemy wyliczyć, jakie konsekwencje pociąga za sobą istnienie samych kondensatów $Q\bar{Q}$, i sprawdzić, czy przewidywania te zgadzają się z obserwacjami poczynionymi w rzeczywistości. Mówiąc dokładniej, na podstawie równań możemy stwierdzić, czy kondensaty $Q\bar{Q}$, traktowane jako substancja, mogą drgać i jak takie drgania powinny wyglądać. Jest to bardzo bliskie tego, o czym marzyli zwolennicy „światłonośnego

eteru” w przypadku światła: o dobrej, staromodnej substancji, bardziej materialnej od pól elektromagnetycznych. Drgania kondensatu $Q\bar{Q}$ nie przejawiają się jako widzialne światło, opisują jednak coś dobrze określonego i możliwego do zaobserwowania, mianowicie mezony *π*, zwane pionami. Piony mają bardzo specyficzne własności odróżniające je od innych hadronów. Na przykład są one bez wątpienia najlżejsze[44] i zawsze sprawiały kłopoty, jeśli chodzi o ich miejsce w modelu kwarkowym. Zatem bardzo dobrze się składa – a gdy pozna się wszystkie szczegóły, jest to niezwykle przekonujący argument – że powstają one w zupełnie odmienny sposób: jako drgania kondensatu $Q\bar{Q}$.

Trzecia odpowiedź jest najbardziej bezpośrednia i efektowna – przynajmniej w zasadzie. Naszą dyskusję zaczęliśmy od eksperymentu *myślowego*, w którym opróżniliśmy przestrzeń. A może by tak zrobić to naprawdę? Zajmują się tym uczeni w relatywistycznym zderzaczu ciężkich jonów (RHIC *relativistic heavy ion collider*) w laboratorium Brookhaven na Long Island, a dalsze prace tego rodzaju planowane są również w LHC. Przeprowadzane przez nich doświadczenia polegają na rozpędzaniu w przeciwnych kierunkach dwóch dużych grup kwarków i gluonów – w postaci ciężkich jąder atomowych, takich jak jądra złota czy ołowiu. Gdy osiągną one bardzo wysokie energie, uczeni doprowadzają do ich zderzenia. Nie jest to najlepszy sposób na badanie podstawowych, elementarnych oddziaływań kwarków i gluonów czy na poszukiwanie subtelnych śladów nowych zjawisk fizycznych, ponieważ dochodzi wówczas jednocześnie do bardzo dużej liczby takich zderzeń. Tak naprawdę uzyskuje się wówczas małą, ale niewiarygodnie gorącą kulę ognia. Przeprowadzone pomiary pokazały, że osiągane wówczas temperatury przekraczają $10^{12}$ stopni (w skali Kelvina, Celsjusza czy Farenheita – na tym poziomie temperatur skalę możemy sobie wybrać dowolnie). Jest to temperatura miliard razy większa od tej panującej na powierzchni Słońca; tak gorąco ostatnio mogło być jedynie pod koniec pierwszej sekundy Wielkiego Wybuchu. W takich temperaturach kondensat $Q\bar{Q}$ wyparowuje: rozpadają się cząsteczki kwark-antykwark, z których się składa. Niewielka objętość

przestrzeni zostaje zatem na krótką chwilę wyczyszczona. Później, gdy kula ognia rozszerza się i ochładza, zaczyna zachodzić nasza reakcja tworzenia par i uwalniania energii – kondensat $Q\bar{Q}$ pojawia się ponownie.

Wszystko to niemal na pewno się dzieje. Musimy jednak użyć słowa „niemal", ponieważ w rzeczywistości możemy jedynie zaobserwować szczątki wyrzucane w czasie ochładzania się kuli ognia. Na rycinie nr 5 kolorowej wkładki pokazano fotografię tego procesu. Oczywiście na takim zdjęciu nie pojawiają się podpisy ze strzałkami mówiące, co odpowiada za każdy z aspektów tego niezwykle skomplikowanego bałaganu. Musimy je dopiero zinterpretować. W tym przypadku interpretacja jest jeszcze bardziej (tak naprawdę zdecydowanie bardziej) skomplikowana niż podczas analizy zdjęć wnętrza protonów i dżetów, omawianych w rozdziale szóstym. Obecnie najdokładniejsze i najpełniejsze interpretacje wykorzystują proces topienia się i ponownego powstawania kondensatu $Q\bar{Q}$, o którym mówiliśmy, nie są one jednak jeszcze tak jasne i przekonujące, jak byśmy tego chcieli. Prace nad tym zagadnieniem cały czas trwają – zarówno doświadczalne, jak i interpretacyjne.

Jeśli chodzi o drugi w kolejności najlepiej poznany kondensat, mamy dobry dowód poszlakowy potwierdzający jego istnienie, możemy jednak jedynie zgadywać, z czego się składa. Dowód ów pojawił się w obszarze fizyki podstawowej, o którym jeszcze nie wspominaliśmy – w teorii tak zwanego oddziaływania słabego[45]. Mamy dobrą teorię oddziaływania słabego[46], która od początku lat siedemdziesiątych XX wieku święci triumf za triumfem. Warto chociażby zwrócić uwagę na fakt, że dzięki tej teorii przewidziano istnienie, masy i szczegółowe własności bozonów *W* oraz *Z*, zanim jeszcze zaobserwowano je doświadczalnie. Teorię tę nazywa się zwykle *Modelem Standardowym* albo modelem Glashowa–Weinberga–Salama, od nazwisk Sheldona Glashowa, Stevena Weinberga i Abdusa Salama – trzech fizyków teoretyków, którzy odegrali kluczową rolę w jego sformułowaniu (za co w 1979 roku otrzymali Nagrodę Nobla).

W Modelu Standardowym bozony *W* (wuony) oraz *Z* (zetony) odgrywają główne role. Spełniają równania bardzo podobne do równań gluonów w chromodynamice kwantowej. Jedne i drugie są opartymi na symetrii rozszerzeniami równań fotonów w elektrodynamice kwantowej (czyli równań Maxwella). Aktywność zachodząca w polach wuonowych i zetonowych powoduje powstanie oddziaływania słabego w takim samym sensie, jak aktywność w polu fotonowym wywołuje oddziaływanie elektromagnetyczne, a aktywność w polu gluonowym jest odpowiedzialna za powstanie oddziaływania silnego.

Uderzające podobieństwa między podstawowymi teoriami pozornie bardzo różnych sił zwracają uwagę na możliwość istnienia syntezy, w której wszystkie te siły byłyby postrzegane jako różne aspekty jednej, bardziej ogólnej struktury. Ich różne symetrie mogą się okazać podsymetriami jakiejś większej, nadrzędnej symetrii. Dodatkowa symetria pozwala na przekształcanie równań w siebie na jeszcze więcej sposobów; innymi słowy, pojawia się więcej sposobów dokonania „rozróżnienia formalnego". Oznacza to, że pojawiają się nowe możliwości powiązania ze sobą prawidłowości, które wcześniej wydawały się ze sobą niezwiązane. Jeżeli nasze podstawowe równania opisują częściowe prawidłowości, które dzięki odpowiednim rozszerzeniom stają się bardziej symetryczne, to aż się prosi, aby wyciągnąć wniosek, że może *są one w rzeczywistości* jedynie różnymi aspektami większej, zunifikowanej struktury. Znane jest powiedzenie Antona Czechowa:

> Jeżeli w akcie pierwszym nad kominkiem wisi strzelba, to można mieć pewność, że w akcie piątym wypali.

No to niniejszym zawieszam strzelbę unifikacji.

Powróćmy do Modelu Standardowego: wuony i zetony są atrakcyjnymi postaciami pierwszoplanowymi, jednak aby mogły pasować do wyznaczonych ról, trzeba im trochę pomóc. Pozostawione same sobie, zgodnie z równaniami określającymi ich własności, będą bezmasowe, tak jak foton i gluony ładunku koloru.

Scenariusz pisany przez rzeczywistość wymaga jednak, żeby cząstki te były ciężkie. To tak, jak gdyby wróżkę z *Piotrusia Pana* obsadzić w roli Świętego Mikołaja. Aby duszek mógł się wcielić w rolę pulchnego staruszka, musimy ubrać go w wypchany poduszkami kostium.

Fizycy wiedzą, jak można tego dokonać – to znaczy spowodować, by wuony i zetony zyskały masę. Tak sądzimy. Naprawdę zaś sama Natura pokazała nam, jak to osiągnąć. Moja żona jest znakomitą pisarką i niewyczerpanym źródłem dobrych rad. Dała mi listę wyświechtanych frazesów, których powinienem się wystrzegać – znalazły się wśród nich określenia takie jak: *niezwykły*, *zdumiewający*, *piękny*, *zapierający dech w piersiach*, *nadzwyczajny* i inne, nietrudne chyba do odgadnięcia. Muszę jednak przyznać, że to, o czym zaraz opowiem, jest moim zdaniem niezwykłe, zdumiewające, piękne, zapierające dech w piersiach i – jakżeby inaczej – nadzwyczajne.

Modelem wyjaśniającym, co można zrobić, by cząstki pośredniczące stały się ciężkie, jest nadprzewodnictwo – to właśnie pokazuje nam sama Natura. Wewnątrz nadprzewodników bowiem *fotony* stają się ciężkie! Bardziej szczegółowe omówienie tego zjawiska przeniosłem do dodatku B, ale najważniejsza jego idea wygląda następująco: jak mówiliśmy, fotony są zaburzeniami przemieszczającymi się w polach elektrycznych i magnetycznych. W nadprzewodniku elektrony na zmiany tych pól reagują bardzo energicznie. Z takim impetem starają się przywrócić równowagę, że wywierają wpływ na poruszające się pola i można powiedzieć, że pociągają je za sobą. Zatem fotony, zamiast poruszać się jak zwykle z prędkością światła, wewnątrz nadprzewodnika przemieszczają się wolniej. Wygląda to tak, jak gdyby wykazywały pewną bezwładność. Jeżeli przyjrzymy się równaniom, to okaże się, że ruchem spowolnionych fotonów w nadprzewodniku rządzą takie same równania jak te, które stosuje się w przypadku cząstek obdarzonych rzeczywistą masą.

Gdybyśmy przypadkiem byli formą życia, której naturalnym środowiskiem jest wnętrze nadprzewodnika, postrzegalibyśmy fotony jako cząstki posiadające masę.

Odwróćmy teraz to rozumowanie. Ludzie są taką formą życia, która w swoim naturalnym środowisku obserwuje, że wuony i zetony – cząstki podobne do fotonów – mają masę. Może więc powinniśmy podejrzewać, że żyjemy we wnętrzu nadprzewodnika? Nie mam oczywiście na myśli nadprzewodnika w tradycyjnym znaczeniu tego słowa, czyli materiału niezwykle dobrego w przewodzeniu ładunku (elektrycznego), w czym pośredniczą fotony. Chodzi mi raczej o nadprzewodnik ładunków, dla których cząstkami pośredniczącymi są wuony i zetony. Na tej idei opiera się Model Standardowy, a on, jak zauważyliśmy, doskonale się sprawdza w opisywaniu rzeczywistości – rzeczywistości, którą zamieszkujemy. W ten sposób zaczynamy podejrzewać, że to, co nazywamy pustą przestrzenią, jest egzotycznym rodzajem nadprzewodnika.

Gdy mamy do czynienia z nadprzewodnictwem, zawsze musi być jakaś przewodząca substancja. Nasze egzotyczne nadprzewodnictwo działa wszędzie, musi to być więc jakiś wypełniający całą przestrzeń materialny eter.

Oto Wielkie Pytanie: Co to za substancja, tak konkretnie? Cóż takiego w tym kosmicznym nadprzewodniku odgrywa taką samą rolę jak elektrony w zwyczajnych nadprzewodnikach?

Niestety, nie może to być ów materialny eter, który tak dobrze poznaliśmy, czyli kondensat $Q\bar{Q}$. Tak naprawdę kondensat ten jest egzotycznym nadprzewodnikiem właściwego rodzaju, który *rzeczywiście* przyczynia się do obdarzenia wuonów i zetonów masą. Jednak jego wpływ jest za mały, mniej więcej o czynnik tysiąc.

Żadna ze znanych obecnie postaci materii nie ma odpowiednich właściwości. Naprawdę więc nie wiemy, czym jest ów nowy materialny eter. Znamy jednak jego nazwę: kondensat Higgsa – został tak nazwany na cześć Petera Higgsa, szkockiego fizyka, który jako pierwszy wysunął niektóre z tych idei. Najprostszą możliwością, jeżeli zgodzimy się, że prostota jest równoznaczna z przyjmowaniem jak najmniejszej liczby założeń, jest hipoteza, że kondensat ten składa się z nowej cząstki, tak zwanej cząstki Higgsa. Kosmiczny nadprzewodnik może jednak być mieszanką kilku substancji. Przecież, jak już wspomnieliśmy, wiemy, że kondensat $QQ$– jest częścią odpowiedzi – niewielką, ale jednak częścią. Jak się później

przekonamy, mamy uzasadnione powody, by podejrzewać, iż na odkrycie czeka cały nowy świat cząstek i że kilka spośród nich odpowiada za działanie kosmicznego nadprzewodnika, znanego również jako kondensat Higgsa.

Na pierwszy rzut oka wydaje się, że najbardziej obiecujące zunifikowane teorie[47] przewidują istnienie wszelkiego rodzaju cząstek, których jeszcze nie zaobserwowaliśmy. Dodatkowe kondensaty mogłyby okazać się tu bardzo pomocne. Nowe kondensaty mogłyby spowodować, że niewygodne cząstki stałyby się bardzo ciężkie – ich działanie byłoby takie samo jak kondensatu Higgsa w przypadku wuonów i zetonów, ale znacznie silniejsze. Cząstki o bardzo dużych masach trudno jest zaobserwować. Aby wytworzyć je jako prawdziwe cząstki, potrzebna jest większa energia, a więc i potężniejsze akceleratory. Nawet ich pośredni wpływ, jako cząstek wirtualnych, jest wówczas mniejszy.

Oczywiście, dodawanie nowych wyrazów do równań tylko dlatego, że wiemy, jak się wytłumaczyć, gdy nie uda się ich zaobserwować, byłoby tanim chwytem. Zunifikowane teorie pola są tak bardzo interesujące, ponieważ wyjaśniają obserwowane cechy otaczającego nas świata, a także – co jeszcze cenniejsze – przewidują nowe. No to teraz powiedziałem wam, że strzelba jest naładowana.

Byt, który postrzegamy jako pustą przestrzeń, jest wielowarstwowym, wielokolorowym nadprzewodnikiem. Cóż za niezwykłe, zdumiewające, piękne i zapierające dech w piersiach pojęcie. A także nadzwyczajne.

## Pole metryczne, kolebka wszystkich Siatek

Oto wspomniany cytat z Einsteina, który zachowałem sobie na później. W roku 1920 tak napisał:

> Zgodnie z ogólną teorią względności trudno sobie wyobrazić przestrzeń bez eteru, ponieważ w przestrzeni takiej nie tylko

> nie dochodziłoby do propagacji światła, ale także nie mogłyby istnieć standardy przestrzeni i czasu (linijki i zegary), a tym samym nie byłoby żadnych interwałów czasoprzestrzennych w sensie fizycznym.

Cytat ten jest odpowiednim wprowadzeniem do omówienia kolebki wszystkich Siatek: pola metrycznego.

Zacznijmy od czegoś prostego i znajomego: przyjrzyjmy się mapom świata[48]. Ponieważ są one płaskie, a to, co mają obrazować – powierzchnia Ziemi – jest (w przybliżeniu) sferyczne, wymagają pewnej interpretacji. Istnieje wiele sposobów sporządzania map obrazujących geometrię powierzchni, którą pokazują. Wszystkie opierają się na takiej samej podstawowej strategii. Kluczową sprawą jest wyznaczenie siatki ze wskazówkami do lokalnego odwzorowania geometrii. Mówiąc konkretnie, w każdym małym obszarze mapy należy określić, który kierunek odpowiada północy, a który wschodowi (oczywiście południe i zachód będą po przeciwnych stronach). Należy również powiedzieć, jaki odcinek na mapie w każdym kierunku odpowiada jednemu kilometrowi – albo mili, milisekundzie świetlnej czy dowolnej innej jednostce – na Ziemi.

Na przykład na mapach opartych na standardowym odwzorowaniu Merkatora północ znajduje się w pionie, a wschód – w poziomie. W takim przypadku powierzchnię Ziemi można wpasować w prostokąt. Podróż „dookoła świata” z zachodu na wschód polega na przemieszczaniu się poziomo od jednej krawędzi mapy do drugiej, bez względu na to, czy podążamy po równiku, czy kole podbiegunowym. Na powierzchni Ziemi natomiast równik ma znacznie większą długość niż koło podbiegunowe, zatem dosłowne czytanie mapy daje nam wypaczony obraz: obszary w pobliżu biegunów wydają się dużo większe od pozostałych regionów, niż są w rzeczywistości. Siatka zaś mówi nam, w jaki sposób można odczytać właściwe odległości. W obszarach podbiegunowych należy używać linijek z większą podziałką! (Na samych biegunach wszystko zaczyna trochę wariować. Cała górna linia mapy odpowiada jednemu punktowi na powierzchni

Ziemi, a mianowicie biegunowi północnemu, cała dolna linia z kolei odwzorowuje biegun południowy).

Cała informacja potrzebna do odtworzenia geometrii powierzchni Ziemi na podstawie mapy znajduje się w zawartych w siatce wskazówkach[49]. Zastanówmy się na przykład, jak można stwierdzić, że mapa opisuje sferę. Wybierzmy najpierw jakiś punkt na mapie. Następnie w każdym kierunku odmierzmy stałą odległość $r$ od tego punktu odniesienia (postępując zgodnie ze wskazaniami siatki) i zaznaczmy to miejsce kropką. Zaznaczone w ten sposób na mapie punkty odpowiadają wszystkim miejscom na powierzchni Ziemi, które są położone w odległości $r$ od punktu odniesienia. Połączmy teraz nasze kropki. Najczęściej (na przykład jeżeli mapę sporządzono zgodnie z odwzorowaniem Merkatora) figura, którą uzyskamy na mapie, nie będzie wyglądała jak okrąg, chociaż na powierzchni Ziemi jest ona rzeczywiście okręgiem. Mimo to, posługując się mapą, możemy zmierzyć długość obwodu tak wyznaczonego okręgu na powierzchni Ziemi. Okaże się, że jest on mniejszy niż $2\pi r$. (Uwaga dla zaawansowanych czytelników: będzie on równy $R \sin(2\pi r/R)$, gdzie $R$ jest promieniem Ziemi). Gdyby mapa była odwzorowaniem płaskiej powierzchni – co nie musiałoby być oczywiste, gdyby siatka była zniekształcona – zmierzona odległość wynosiłaby dokładnie $2\pi r$. Mogłoby się również okazać, że obwód ten jest większy od $2\pi r$. Oznaczałoby to, że mapa opisuje powierzchnię o kształcie siodła. Zgodnie z definicją sfery mają oczywiście dodatnią krzywiznę, płaskie powierzchnie – zerową, a powierzchnie o kształcie siodła mają krzywiznę *ujemną*.

Chociaż wyobrażenie sobie tego staje się znacznie trudniejsze, te same pojęcia obowiązują w przestrzeniach trójwymiarowych. Zamiast siatki ze wskazówkami do odwzorowania geometrii narysowanej na kartce możemy rozważyć taką siatkę wypełniającą pewien trójwymiarowy obszar. Takie pogrubione „mapy” zawierają (jako przekroje) dwuwymiarowe mapy, które właśnie omówiliśmy, a także instrukcje dotyczące składania tych przekrojów w całość. Opisują one zakrzywione trójwymiarowe przestrzenie.

Zamiast więc operować bezpośrednio skomplikowanymi trójwymiarowymi kształtami, które (w najlepszym wypadku) bardzo trudno sobie wyobrazić, możemy działać w zwyczajnej przestrzeni, wykorzystując siatki ze wskazówkami. Możemy pracować na takich mapach, nie gubiąc przy tym żadnej informacji.

Siatka ze wskazówkami do lokalnego odwzorowania geometrii w literaturze naukowej nazywana jest *polem metrycznym*. Dzięki nauce, jaką wyciągnęliśmy z rozważań dotyczących map, wiemy, że geometria powierzchni lub zakrzywionych przestrzeni w wyższych wymiarach jest równoważna siatce, inaczej polu, ze wskazówkami mówiącymi, jak należy lokalnie wyznaczać kierunki i mierzyć odległości. „Przestrzenią", w której budowana jest mapa, może być macierz punktów lub nawet tablica rejestrów w komputerze. Gdy już mamy odpowiednią siatkę ze wskazówkami, czyli pole metryczne, każde z tych abstrakcyjnych przedstawień może nam posłużyć do wiernego odwzorowania skomplikowanej geometrii. Kartografowie i specjaliści od grafiki komputerowej są ekspertami w wykorzystywaniu tych możliwości.

Możemy też do tego obrazu dołożyć czas. Ze szczególnej teorii względności wynika, że to, co jest czasem dla jednego obserwatora, dla kogoś innego będzie mieszaniną przestrzeni i czasu, jednakowe traktowanie przestrzeni i czasu jest więc całkowicie naturalne. Aby to osiągnąć, musimy skonstruować czterowymiarową macierz. Siatka ze wskazówkami, czyli pole metryczne, w każdym punkcie określa, które trzy kierunki należy traktować jako wymiary przestrzenne – możemy nazywać je kierunkami na północ, wschód i do góry, chociaż gdybyśmy sporządzali mapę przestrzeni kosmicznej, nazwy te brzmiałyby dziwacznie[50] – i jakie są standardy pomiaru długości w tych kierunkach. Stwierdza również, że jeszcze inny kierunek reprezentuje czas, i podaje regułę przeliczania długości mierzonych na mapie w tym kierunku na odcinki czasu.

Do sformułowania praw grawitacji w ramach ogólnej teorii względności Einstein posłużył się pojęciem zakrzywienia czasoprzestrzeni. Z drugiej zasady dynamiki Newtona wynika, że jeżeli na ciało nie działa żadna siła, to będzie się ono poruszało

ze stałą prędkością po linii prostej. Ogólna teoria względności modyfikuje tę zasadę, twierdząc, że ciała poruszają się w czasoprzestrzeni po najprostszych możliwych torach (tak zwanych liniach geodezyjnych). Jeśli czasoprzestrzeń jest zakrzywiona, nawet najprostsza możliwa linia wykrzywia się w różnych kierunkach, ponieważ musi się dostosować do zmian w lokalnej geometrii. Po złożeniu tych wszystkich idei razem powiemy, że ciała reagują na pole metryczne. Wszystkie te pagórki i zakręty czasoprzestrzennej trajektorii ciała – mówiąc językiem opisującym ruch: jego zmiany kierunku i prędkości – są według ogólnej teorii względności alternatywnym, dokładniejszym opisem efektu nazywanego dotychczas grawitacją.

Ogólną teorię względności można opisać za pomocą dowolnej z dwóch matematycznie równoważnych idei: zakrzywienia czasoprzestrzeni lub pola metrycznego. Matematycy, mistycy i eksperci od ogólnej teorii względności wolą zwykle obraz geometryczny z uwagi na jego elegancję. Fizycy wychowani w bardziej empirycznej tradycji fizyki wysokich energii i kwantowej teorii pola skłaniają się raczej do operowania polem metrycznym, ponieważ obraz taki lepiej odzwierciedla sposób przeprowadzania konkretnych obliczeń. Co ważniejsze, jak za chwilę się przekonamy, posłużenie się polem powoduje, że einsteinowska teoria grawitacji bardziej przypomina inne ważne teorie fizyki podstawowej i dzięki temu łatwiej można zmierzać w kierunku w pełni zintegrowanego, zunifikowanego opisu wszystkich praw. Jak się zapewne domyślacie, ja należę do osób preferujących pola.

Ogólna teoria względności po zapisaniu jej za pomocą pola metrycznego przypomina teorię pola elektromagnetyzmu. W teorii elektromagnetyzmu pola elektryczne i magnetyczne zakrzywiają tor ruchu ciał z ładunkiem elektrycznym i takich, przez które przepływa prąd. W ogólnej teorii względności pole metryczne zakrzywia tor ruchu ciał mających energię i pęd. Pozostałe oddziaływania fundamentalne również przypominają elektromagnetyzm. W QCD tor ruchu ciał obdarzonych ładunkiem koloru ulega zakrzywieniu w polu gluonowym; w przypadku oddziaływania słabego udział biorą jeszcze

inne rodzaje ładunku i pól. Jednak we wszystkich tych przypadkach podstawowa struktura równań jest bardzo podobna.

Podobieństwa te sięgają głębiej. Ładunki elektryczne i prąd wpływają na siłę znajdujących się w pobliżu pól elektrycznych i magnetycznych – to znaczy, ich średnią siłę, z pominięciem kwantowych fluktuacji. Jest to „reakcja" pól na oddziaływanie („akcję") z ciałami obdarzonymi ładunkiem. Podobnie siła pola metrycznego zmienia się pod wpływem wszystkich ciał posiadających energię i pęd (a mają je wszystkie znane formy materii). Zatem obecność ciała A wpływa na pole metryczne, które z kolei wywiera wpływ na tor ruchu innego ciała, B. W ten sposób ogólna teoria względności wyjaśnia zjawisko wcześniej znane jako oddziaływanie grawitacyjne dwóch ciał. I chociaż detronizuje teorię Newtona, potwierdza słuszność jego intuicyjnej niechęci do idei oddziaływania na odległość.

Spójność wymaga, żeby pole metryczne, tak jak pozostałe, było polem *kwantowym*. To znaczy, że pole metryczne podlega fluktuacjom. Nie mamy dobrej teorii takich fluktuacji. Wiemy, że efekty fluktuacji kwantowych pola metrycznego są zwykle – a z naszego dotychczasowego doświadczenia wynika, że nawet zawsze – niewielkie z praktycznego punktu widzenia: dowodzi tego fakt, że teorie, w których je pomijamy, doskonale się sprawdzają! Od precyzyjnej biochemii poprzez niezwykłe zdarzenia w akceleratorach, ewolucję gwiazd, aż po wczesne chwile Wielkiego Wybuchu – we wszystkich tych obszarach mogliśmy wysunąć dokładne przewidywania i potwierdzić je z dużą precyzją, mimo że pomijaliśmy możliwe fluktuacje kwantowe pola metrycznego. Co więcej, działanie współczesnego systemu GPS opiera się na bezpośrednim tworzeniu map czasoprzestrzennych. I chociaż nie uwzględnia się w nim poprawek wynikających z grawitacji kwantowej, system ten sprawdza się doskonale. Fizycy doświadczalni bardzo starają się wykryć *jakikolwiek* efekt, który można by przypisać fluktuacjom kwantowym w polu metrycznym, czyli innymi słowy, kwantowej grawitacji. Na odkrywcę takiego efektu

z pewnością czeka Nagroda Nobla i wieczna sława. Jak dotąd, nic takiego się nie wydarzyło[51].

Niemniej pytanie z bluzy sprzedawanej na Uniwersytecie Chicagowskim wciąż jest aktualne: „To sprawdza się w praktyce, ale co z teorią?". Musimy się zmierzyć z problemem bardzo przypominającym trudności, które omówiłem w rozdziale szóstym przy okazji przedstawiania modelu kwarkowego, a w szczególności modelu partonowego. Wówczas zastanawiając się nad tymi problemami teoretycznymi, doszliśmy do pojęcia swobody asymptotycznej i pełnej, niezwykle udanej teorii kwarków i (właśnie wówczas przewidzianych!) gluonów ładunku koloru. Analogiczny problem w kwantowej grawitacji nie został jeszcze rozwiązany. Teoria superstrun[52] jest odważną próbą uporania się z nim, ale wiele jeszcze w niej pozostaje do zrobienia. Obecnie bardziej jest to zbiór wskazówek, jak mogłaby wyglądać teoria, niż konkretny model świata z określonymi algorytmami i przewidywaniami. Poza tym nie obejmuje w wystarczającym stopniu podstawowych idei Siatki. (Uwaga dla zaawansowanych czytelników: strunowa teoria pola jest co najmniej niezgrabna).

Podrozdział rozpoczęliśmy od cytatu, w którym Einstein stwierdza, iż „trudno sobie wyobrazić" czasoprzestrzeń bez pola metrycznego. Jeśli słowa te zinterpretujemy dosłownie, będzie to oczywiście nieprawda – bez trudu można sobie taką czasoprzestrzeń wyobrazić! Powróćmy do naszej mapy. Jeżeli siatka ze wskazówkami zostanie wymazana lub zaginie, mapa wciąż wiele nam powie. Będziemy mogli z niej na przykład wyczytać, które kraje leżą obok siebie. Nie dowiemy się tylko dokładnie, jak duże one są albo jaki mają kształt. Nawet bez znajomości ich rozmiaru i kształtu wciąż będziemy dysponowali informacją topologiczną. Na jej podstawie można wysnuć wiele wniosków.

Einsteinowi chodziło o to, że trudno sobie wyobrazić, jak świat fizyczny mógłby funkcjonować bez pola metrycznego. Światło nie wiedziałoby, w którym kierunku się przemieszczać ani jak szybko; nie wiedzielibyśmy, co takiego mają mierzyć linijki i zegary. Znanych Einsteinowi równań opisujących światło oraz materiały, z których

można zbudować linijki i zegary, nie można sformułować bez pola metrycznego.

To prawda, ale wiele spraw we współczesnej fizyce trudno sobie wyobrazić. Musimy pozwolić, żeby pojęcia i równania prowadziły nas, dokąd chcą. To, co powiedział na ten temat Hertz, jest tak ważne (i tak trafnie wyrażone), że warto tę opinię powtórzyć:

> Trudno oprzeć się wrażeniu, że te wzory matematyczne żyją niezależnym życiem i posiadają własną inteligencję, że są mądrzejsze od nas samych, mądrzejsze nawet od swoich odkrywców, że dowiadujemy się za ich pomocą więcej, niż pierwotnie w nich zapisano.

Innymi słowy, formułowane przez nas równania – i bardziej ogólnie: pojęcia – nie są jedynie naszymi wytworami, ale również naszymi nauczycielami.

W takim świetle odkrycie, że Siatka wypełniona jest różnymi substancjami, czyli kondensatami, prowadzi do oczywistego pytania: Czy pole metryczne jest kondensatem? Czy to możliwe, że jest ono zbudowane z czegoś bardziej podstawowego? A tu się rodzi kolejne pytanie: Czy pole metryczne, podobnie jak kondensat $QQ$–, wyparowało na początku Wszechświata, w najwcześniejszych chwilach Wielkiego Wybuchu?

Pozytywna odpowiedź pozwoliłaby nam w nowy sposób zająć się kwestią, która tak trapiła świętego Augustyna: „Co robił Bóg *przed* stworzeniem świata?”. (Podtekst: Na co On czekał? Czy nie byłoby lepiej, gdyby zaczął wcześniej?) Święty Augustyn dał dwie odpowiedzi:

> Odpowiedź pierwsza: Zanim Bóg stworzył świat, zajęty był tworzeniem piekła dla ludzi zadających głupie pytania.
> Odpowiedź druga: Przed stworzeniem świata nie istniała żadna „przeszłość”, zatem pytanie to nie ma sensu.

Pierwsza odpowiedź jest zabawniejsza, ale druga, wyłożona rozwlekle w rozdziale dziesiątym jego *Wyznań* – bardziej interesująca. Argumentacja Augustyna zasadza się na tym, że przeszłość już nie istnieje, a przyszłość jeszcze nie istnieje; mówiąc wprost, istnieje wyłącznie teraźniejszość. Przeszłość jednak w pewnym sensie żyje w umysłach jako wspomnienie (podobnie przyszłość – jako oczekiwanie). Aby zatem istniała przeszłość, musi istnieć umysł i tym samym nie może być żadnego „przedtem" bez istnienia umysłu. Przed stworzeniem umysłów nie było żadnego przedtem!

Współczesna, świecka wersja pytania Augustyna brzmi: „Co się wydarzyło przed Wielkim Wybuchem?". Ważność mogłaby w tym przypadku zachować druga odpowiedź, w zmodyfikowanej wersji opartej na fizyce. Nie chodzi o to, że umysły są konieczne dla istnienia czasu – nie sądzę, by wielu fizyków zgodziło się z takim poglądem (a z pewnością nie zgadzają się z nim równania fizyki). Jeżeli jednak pole metryczne wyparowuje, razem z nim znika standard czasu. Gdy przestają istnieć *zegary* (a przez to rozumiem nie tylko skomplikowane urządzenia do mierzenia czasu, ale każdy proces fizyczny, który mógłby do tego celu służyć), sam czas, razem z całym pojęciem „przedtem", traci wszelki sens. Upływ czasu rozpoczyna się wraz z wytrąceniem się pola metrycznego.

Czy pole metryczne mogłoby zmienić się w jakiś inny sposób (ulec krystalizacji?) pod wpływem ciśnienia, na przykład w pobliżu środka czarnej dziury? (Wiemy, że pod wpływem ciśnienia kwarki tworzą dziwne kondensaty o zabawnych nazwach, takich jak nadprzewodnik z synchronizacją koloru i zapachu, różniące się od *QQ*–).

Czy ta bardziej podstawowa substancja, z której zbudowane jest pole metryczne, może być tym, czego potrzebujemy do zunifikowania pozostałych sił?

Świetnie pytania, mam nadzieję, że też tak uważacie! Niestety, nie mamy jeszcze odpowiedzi godnych tak doskonałych pytań. (Pracuję nad tym…). Jednak fakt, że możemy postawić pytania i poważnie zastanawiać się nad możliwościami, które nawet dla Einsteina były „trudne do wyobrażenia", jest znakiem naszego postępu i wzrostu

ambicji. Mamy teraz lepsze pytania i bogatsze pojęcia – i pozwalamy, żeby nami kierowały.

## Siatka ma swoją wagę

Tradycyjnie to masę uważano za podstawową własność materii, ową niepowtarzalną cechę, która nadaje substancjom ich substancjalność. Dlatego niedawne odkrycie astronomiczne, że Siatka ma swoją wagę – że byt, który postrzegamy jako pustą przestrzeń, ma wszędzie niezerową gęstość – jest koronnym dowodem jej fizycznego istnienia. Chociaż odkrycie to pozostaje drugoplanowym wątkiem w naszej opowieści, poświęcę kilka stron na omówienie jego natury i wynikających z niego dla kosmologii wniosków, ponieważ ma ono fundamentalne znaczenie, a przy tym jest niezwykle ciekawe[53].

Pojęcie gęstości Siatki jest w zasadzie równoważne einsteinowskiemu członowi kosmologicznemu, który jest w istocie rzeczy tym samym co „ciemna energia". Istnieją wprawdzie niewielkie różnice w interpretacji i rozłożeniu akcentów, które wyjaśnię w trakcie omawiania tematu, ale wszystkie trzy pojęcia odwołują się do tego samego zjawiska fizycznego.

W roku 1917 Einstein wprowadził modyfikację do równań, które dwa lata wcześniej przedstawił w ramach ogólnej teorii względności. Skłoniła go do tego kosmologia. Uważał, że Wszechświat ma stałą gęstość, zarówno w czasie, jak i (po uśrednieniu) w przestrzeni, pragnął więc uzyskać rozwiązanie o takich własnościach. Gdy jednak zastosował swoje pierwotne równania do Wszechświata jako całości, nie potrafił uzyskać takiego wyniku. Nietrudno było się zorientować, jaki problem jest tego przyczyną. Przewidział go już Newton w 1692 roku w słynnym liście do Richarda Bentleya:

> (…) Wydaje mi, że gdyby materia naszego Słońca i planet oraz cała materia Wszechświata była równomiernie rozmieszczona

> na całym niebie i każda cząstka odczuwałaby właściwe sobie przyciąganie grawitacyjne do wszystkich pozostałych cząstek, a przy tym cała przestrzeń, w której materia jest rozmieszczona, byłaby skończona, to materia na zewnątrz owej przestrzeni pod wpływem własnej grawitacji zmierzałaby w kierunku materii znajdującej się wewnątrz i w efekcie wpadłaby do środka i utworzyła tam olbrzymią kulistą masę. Gdyby jednak materia była równomiernie rozmieszczona w nieskończonej przestrzeni, nigdy nie mogłaby skupić się w jedną masę; chociaż pewna jej część utworzyłaby jedno skupisko masy, a inna – drugie (…)

Mówiąc prosto: grawitacja w całym Wszechświecie wywiera siłę przyciągającą, nie lubi więc, gdy ciała pozostają rozdzielone. Ponieważ grawitacja zawsze stara się wszystko razem skupić, nie powinno dla nikogo być zbyt dużym zaskoczeniem, że nie można znaleźć rozwiązania, w którym Wszechświat zachowuje stałą gęstość.

Aby uzyskać rozwiązanie, jakiego pragnął, Einstein zmienił równania. Dokonał jednak tego w szczególny sposób, tak aby nie zniszczyć ich najlepszej cechy, a mianowicie tego, że opisują grawitację w sposób zgodny ze szczególną teorią względności. W zasadzie istnieje tylko jeden sposób dokonania takiej poprawki. Einstein nazwał nowy składnik, który dodał do równań grawitacyjnych, „członem kosmologicznym". Nie odwoływał się tak naprawdę do fizycznej interpretacji tego wyrazu, ale współczesna fizyka przedstawia taką przekonującą interpretację i już za chwilę ją omówię.

Przesłanki, które skłoniły Einsteina do wprowadzenia członu kosmologicznego, szybko jednak stały się nieaktualne, ponieważ w latach dwudziestych XX wieku zaczęły się pojawiać coraz poważniejsze dowody rozszerzania się Wszechświata, głównie dzięki pracom Edwina Hubble'a. Idee, za sprawą których przegapił okazję, by przewidzieć zjawisko rozszerzania się Wszechświata, Einstein nazwał swoją „największą pomyłką". (I naprawdę były pomyłką,

ponieważ przedstawiony przez niego model Wszechświata, nawet zgodnie ze zmodyfikowanymi równaniami, jest niestabilny. Rozwiązaniem jest idealnie jednorodny rozkład gęstości, ale każde nieznaczne nawet odchylenie od jednorodności potęguje się z upływem czasu). Tymczasem możliwość, którą znalazł – dodanie nowego członu do równań ogólnej teorii względności bez jej niszczenia – okazała się prorocza.

Człon kosmologiczny można postrzegać dwojako. Niczym równania $E = mc^2$ oraz $m = E/c^2$, są to matematycznie równoważne postacie skłaniające do różnych interpretacji. Jedną z tych możliwości (tak widział to Einstein) jest traktowanie członu kosmologicznego jako modyfikacji prawa grawitacji. Można też interpretować ten wyraz jako wynik występowania wszędzie w przestrzeni i przez cały czas pewnej stałej gęstości masy oraz stałego ciśnienia. Ponieważ zarówno masa/gęstość, jak i ciśnienie mają wszędzie taką samą wartość, można je uważać za cechy właściwe samej przestrzeni. Tak to wygląda z punktu widzenia Siatki. Jeżeli przyjmiemy za dane, że przestrzeń ma takie własności, i skupimy się wyłącznie na grawitacyjnych konsekwencjach tego faktu, dojdziemy z powrotem do punktu widzenia Einsteina.

Kluczowa zależność decydująca o fizycznej interpretacji członu kosmologicznego wiąże jego gęstość $\rho$ z wywieranym przezeń ciśnieniem $p$ oraz z prędkością światła $c$. Równanie to nie ma żadnej zwyczajowej nazwy, chociaż dobrze byłoby, gdyby takową miało. Będę je więc nazywał „dobrze nastrojonym równaniem”[54], ponieważ opisuje, jak poprawnie należy dostroić Siatkę. Dobrze nastrojone równanie wygląda następująco:

$$\rho = -p/c^2 \quad (1)$$

Skąd się ono wzięło? Co oznacza?

Równanie to wygląda niczym zmutowany klon drugiego prawa Einsteina: $m = E/c^2$. Symbol $m$ zmienił się w $\rho$, a $E$ na $p$ (no i jest

jeszcze znak „–”), ale trudno nie zauważyć podobieństwa. I rzeczywiście, równania te są ze sobą głęboko powiązane.

Drugie prawo Einsteina wiąże energię odizolowanego ciała w spoczynku z jego masą (zob. rozdział trzeci oraz dodatek A). Związek ten wynika ze szczególnej teorii względności, choć nie jest on widoczny od razu, na pierwszy rzut oka. Tak naprawdę nie pojawił się w pierwszym artykule poświęconym teorii względności, dopiero później Einstein napisał oddzielny tekst na ten temat.

Również dobrze nastrojone równanie wynika ze szczególnej teorii względności, jednak jest konsekwencją zastosowania jej do jednorodnej, wypełniającej przestrzeń substancji, a nie do odizolowanego ciała. Nie od razu staje się jasne, dlaczego niezerowa gęstość Siatki może być zgodna ze szczególną teorią względności. Aby zrozumieć ten problem, powróćmy do słynnego skrócenia Lorentza–Fitzgeralda, o którym mówiliśmy już w rozdziale szóstym. Obserwator poruszający się ze stałą prędkością widzi mijane obiekty jako skrócone w kierunku ruchu. Mogłoby się więc wydawać, że taki obserwator stwierdzi, iż gęstość Siatki jest większa. Byłoby to sprzeczne z symetrią „pchnięcia” teorii względności, zgodnie z którą prawa fizyki obowiązujące u takiego obserwatora muszą być takie same.

Dobrze nastrojone równanie wskazuje, że wyjściem z tej sytuacji jest ciśnienie towarzyszące gęstości. Zgodnie z równaniami szczególnej teorii względności poruszający się obserwator za pomocą swojej wagi zmierzy nową gęstość będącą mieszanką starej gęstości i starego ciśnienia – tak samo jak (to może bardziej znany przykład) jego zegar zarejestruje odcinki czasu będące mieszanką starych odcinków czasu i starych odcinków przestrzeni. Nowa gęstość i nowe ciśnienie będą takie same jak stare wtedy i tylko wtedy, gdy stara gęstość i stare ciśnienie będą ze sobą powiązane tak, jak to opisuje dobrze nastrojone równanie.

Dla kosmologii gęstości Siatki kluczowe znaczenie ma inny wniosek płynący z dobrze nastrojonego równania, blisko związany z omówionym właśnie zagadnieniem. W rozszerzającym się wszechświecie gęstość każdego normalnego rodzaju materii będzie spadała. Jednak gęstość dobrze nastrojonej siatki pozostanie stała!

Jeżeli macie ochotę na małe ćwiczenie z podstaw fizyki i algebry, poniżej przedstawiam ciekawy związek łączący stałość gęstości bezpośrednio z drugim prawem Einsteina. (Jeżeli nie, omińcie po prostu następny paragraf).

Rozważmy przestrzeń o objętości $V$ wypełnioną Siatką o gęstości $\rho$. Przyjmijmy, że przestrzeń rozszerzyła się o $\delta V$. Zwykle gdy ciało rozszerza się pod wpływem ciśnienia, wykonuje pracę i tym samym traci energię. Jednak znak minus w równaniu na dobrze nastrojoną Siatkę daje nam *ujemne* ciśnienie $p = -\rho c^2$. Zatem zgodnie z drugim prawem Einsteina jej masa wzrośnie o $\delta V \times \rho$. To właśnie tyle, ile potrzeba, żeby wypełnić dodatkową objętość $\delta V$ gęstością $\rho$, i dzięki temu gęstość Siatki pozostaje stała.

Każdy z omówionych przez nas składników Siatki – różnorodne fluktuujące pola kwantowe, kondensat $Q$Q–, kondensat Higgsa, kondensat ratujący unifikację, czasoprzestrzenne pole metryczne (może również jest kondensatem?) – jest dobrze dostrojony. Wszystkie te wypełniające przestrzeń byty zachowują się zgodnie z dobrze nastrojonym równaniem, ponieważ przejawiają symetrię „pchnięcia" szczególnej teorii względności.

Można oddzielnie zmierzyć gęstość i ciśnienie kosmosu, posługując się różnymi technikami. Gęstość ma wpływ na zakrzywienie przestrzeni, które astronomowie mogą zmierzyć, badając odkształcenie, jakie powoduje ono w obrazach dalekich galaktyk albo – wykorzystując potężną nową technikę – w kosmicznym mikrofalowym promieniowaniu tła. Dzięki tej nowej technice do 2001 roku kilku grupom uczonych udało się dowieść[55], że we Wszechświecie znajduje się dużo więcej masy, niż można wyjaśnić, biorąc pod uwagę jedynie zwykłą materię. Wydaje się, że około 70% całkowitej masy jest bardzo jednorodnie rozmieszczone, zarówno w przestrzeni, jak i czasie.

Ciśnienie ma wpływ na tempo rozszerzania się Wszechświata, które można zmierzyć, badając odległe supernowe. Ich jasność mówi nam, jak daleko od nas się znajdują, natomiast przesunięcie ku czerwieni widm ich światła świadczy o prędkości, z jaką się od nas oddalają. Ponieważ prędkość światła jest stała, obserwując najdalsze gwiazdy,

zaglądamy tak naprawdę w ich przeszłość. Dlatego obserwacje supernowych pozwalają nam odtworzyć historię rozszerzania się Wszechświata. W 1998 roku dwie duże grupy obserwatorów doniosły, że tempo rozszerzania się Wszechświata rośnie. Było to dużą niespodzianką, ponieważ zwyczajne przyciąganie grawitacyjne powinno działać jak hamulec. Musiał dojść tutaj do głosu jakiś nowy efekt. Najprostszą możliwością jest powszechne ujemne ciśnienie wzmacniające prędkość ekspansji.

Zaczęto używać określenia *ciemna energia*, mając na myśli obydwa te odkrycia: dodatkową masę i wzrost tempa ekspansji. Chodziło o to, żeby nie sugerować niczego na temat względnych wartości gęstości i ciśnienia. Gdybyśmy po prostu nazwali oba te odkrycia członem kosmologicznym, przesądzilibyśmy z góry, jakie są ich względne wielkości. Najwyraźniej jednak mielibyśmy rację. Te dwie bardzo różne wielkości – gęstość masy kosmosu i jego ciśnienie – mierzone za pomocą różnych technik, rzeczywiście, jak się zdaje, są ze sobą związane relacją $\rho = -p/c^2$.

Czy astronomiczne odkrycie, że przestrzeń ma swój ciężar i może spełniać dobrze nastrojone równanie, jest wspaniałym potwierdzeniem istnienia głębokich struktur, na których wznieśliśmy nasze najlepsze modele świata? Tak i nie. A mówiąc szczerze, zapewne powinienem raczej napisać: $_{\text{tak}}$ i NIE.

Problem w tym, że zmierzona przez astronomów całkowita gęstość jest o wiele mniejsza od prostych oszacowań tego, co można uzyskać z jakichkolwiek sugerowanych przez nas kondensatów. Oto proste oszacowania poszczególnych gęstości, wyrażone jako wielokrotności gęstości zmierzonej w rzeczywistości przez astronomów:

- kondensat kwark-antykwark: $10^{44}$,
- kondensat nadprzewodzący oddziaływania słabego: $10^{56}$,
- kondensat nadprzewodzący unifikacji: $10^{112}$,
- fluktuacje kwantowe bez supersymetrii: $\infty$,
- fluktuacje kwantowe z supersymetrią[56]: $10^{60}$,
- metryka czasoprzestrzeni: ? (Fizyka jest w tym przypadku mało przejrzysta i trudno podać proste oszacowanie).

Gdyby którekolwiek z tych prostych oszacowań było poprawne, ewolucja Wszechświata przebiegałaby *znacznie* szybciej, niż to obserwujemy.

Dlaczego rzeczywista gęstość przestrzeni jest znacznie mniejsza? Może mamy do czynienia z jakimś dalekosiężnym spiskiem wymienionych przed chwilą, a może i innych czynników – z tym że niektóre muszą wnosić ujemny wkład – który powoduje, iż wypadkowa wartość jest dużo mniejsza od pojedynczych wkładów poszczególnych elementów. Może w naszym rozumieniu tego, jak grawitacja reaguje na gęstość Siatki, tkwi jakaś brzemienna w skutki luka? A może i jedno, i drugie? Nie wiemy.

Przed odkryciem ciemnej energii większość fizyków teoretyków, patrząc na olbrzymi rozziew między prostymi oszacowaniami gęstości przestrzeni a rzeczywistością, miała nadzieję, że jakieś genialne spostrzeżenie pozwoli poznać powód, dla którego prawdziwą odpowiedzią jest wartość zero. Stwierdzenie Feynmana – *ponieważ niczego tam nie ma* – było najlepszą, a przynajmniej najzabawniejszą próbą wyjaśnienia, jaką dotąd usłyszałem. Jeżeli poprawną odpowiedzią nie jest wartość zero, będziemy potrzebować nowych idei. (Wciąż istnieje logiczna możliwość, że całkowita gęstość wynosi zero albo że Wszechświat bardzo wolno do tej wartości zmierza).

Obecnie powszechnie uważa się, że na wypadkową wartość gęstości składa się wiele różnych kondensatów; niektóre wnoszą wkład dodatni, a inne ujemny[57]. Jedynie w przypadku, gdy wkłady te znoszą się niemal doskonale, uzyskujemy powoli ewoluujący wszechświat, na tyle przyjazny, by mógł zostać zaobserwowany. Obserwowalny wszechświat musi zapewnić swoim potencjalnym obserwatorom wystarczająco długi okres spokoju, aby zdążyli wyewoluować. Dlatego właśnie (według tej hipotezy) obserwujemy nieprawdopodobnie małą całkowitą gęstość Siatki, ponieważ gdyby była ona znacznie większa, nie byłoby tu nikogo zdolnego do prowadzenia badań. Może i tak jest, ale z idei tej trudno wysnuć jakieś precyzyjne przewidywania, czy też w inny sposób ją sprawdzić. Czasami dzięki gromadzeniu wielu danych udaje się

nam zmienić niepewność w dokładność – na przykład w przypadku tablic aktuarialnych czy stosowania mechaniki kwantowej. Gdy jednak chodzi o Wszechświat, musimy sobie radzić, mając dostęp do zbioru danych o liczebności jeden.

Tak czy inaczej, w tym jednym Wszechświecie, któremu się przyjrzeliśmy, Siatka ma swoją wagę. Na szczęście do wyciągnięcia *tego* wniosku jeden wszechświat wystarcza.

## Podsumowanie

Na początku rozdziału przedstawiłem kluczowe własności Siatki, owej prasubstancji leżącej u podstaw fizycznej rzeczywistości:

- Siatka wypełnia przestrzeń i czas.
- Każdy fragment Siatki – każdy element czasoprzestrzeni – ma takie same podstawowe własności.
- W Siatce aż buzuje od kwantowej aktywności. Aktywność *kwantowa* ma pewne cechy szczególne. Jest spontaniczna i nieprzewidywalna. Poza tym próba zaobserwowania kwantowej aktywności musi się wiązać z jej zakłóceniem.
- Siatka zawiera również trwałe, materialne składniki. Kosmos jest wielowarstwowym, wielokolorowym nadprzewodnikiem.
- Siatka zawiera pole metryczne nadające czasoprzestrzeni sztywność i wywołujące grawitację.
- Siatka ma swoją wagę i wszędzie taką samą gęstość.

Mam nadzieję, że po takiej kampanii reklamowej dacie się przekonać!

34 Będziemy o tym jeszcze mówić.

35 Titus Lucretius Carus, O naturze rzeczy, przeł. Grzegorz Żurek, PIW, Warszawa 1994, s. 64 (przyp. tłum.).

36 Z czym niespójne? Z zasadą zachowania ładunku. Maxwell zastosował znane równania do teoretycznego układu elektrycznego zawierającego element, który

obecnie zwiemy kondensatorem, i odkrył, że równania te wymagają, by ładunek elektryczny pojawiał się znikąd. Ponieważ dowody eksperymentalne potwierdzające we wszystkich okolicznościach zasadę zachowania ładunku były bardzo mocne, Maxwell odpowiednio zmodyfikował równania.

37 W kolejnym artykule wyprowadził drugie prawo Einsteina.

38 Podkreślenie: F. Wilczek.

39 Fragment wystąpienia na uniwersytecie w Glasgow w 1993 roku. Kolejny cytat, na temat „równoczesności", pochodzi z *Zapisków autobiograficznych* Einsteina.

40 Albert Einstein, Zapiski autobiograficzne, przeł. Jacek Bieroń, Znak, Kraków 1996, s. 33–34 (przyp. tłum.).

41 Żadna gra słów nie była w tym miejscu zamierzona. To nie jest żart.

42 W tych rozważaniach na temat nieuchronności pól odwołuję się do uniwersalnej wartości „dokładnie teraz", do wyznaczania wartości pól w przyszłości na podstawie ich wartości w chwili obecnej i tak dalej. Czy takie podejście jest uzasadnione, jeśli weźmiemy pod uwagę upadek pojęcia równoczesności?

Odpowiedź szczegółowa: W układzie poruszającym się ze stałą prędkością poziomy przekrój „dokładnie teraz" zmieni się w przekrój nachylony pod pewnym kątem. Ponieważ jednak równania wciąż są takie same, możliwe będzie wyliczenie wartości pola poza tym przekrojem na podstawie wartości na przekroju. (Mówiąc ściśle, musimy znać wartości zarówno pól, jak i ich pochodnych po czasie). Krótka odpowiedź: inne „teraz", to samo rozumowanie.

Wciąż jednak nie możemy się pozbyć uczucia wyraźnego napięcia, które powoduje, że doprowadzenie do mariażu teorii kwantowej z teorią względności jest tak trudne. W równaniach teorii kwantowej i ich interpretacji czas jest traktowany zupełnie inaczej niż przestrzeń. Natomiast w równaniach teorii względności czas i przestrzeń są ze sobą wymieszane. Gdy zajmujemy się zatem mechaniką kwantową, musimy wprowadzić bardzo wyraźne *rozróżnienie* między czasem i przestrzenią, ale musimy też wykazać – jeżeli wierzymy w teorię względności – że w ostatecznym rozrachunku nie robi to *różnicy*. Takie są właśnie podstawowe powody, dla których tak trudno jest stworzyć teorie kwantowe zgodne ze szczególną teorią względności. Jedyny znany nam sposób osiągnięcia tego wymaga użycia skomplikowanego formalizmu kwantowej teorii pola (albo

prawdopodobnie jeszcze bardziej złożonego – i wciąż nieukończonego – formalizmu teorii superstrun). Z drugiej strony zatem trudność ta prowadzi nas wprost w bardzo wąskie, dobrze określone ramy teoretyczne: do (dla znawców tematu: lokalnej) kwantowej teorii pola. Na szczęście okazuje się, że w fizycznej teorii Rdzenia w ramach takiej właśnie teorii działa również Natura. Wracając do małżeńskiej przenośni: gdy komuś bardzo wybrednemu wobec swojego przyszłego partnera uda się w końcu kogoś w ogóle znaleźć, to są duże szanse, że będzie to właściwa osoba!

43 To znaczy w pierwszym dobrym przybliżeniu.

44 Uwaga dla znawców tematu: oprócz tego przestają oddziaływać w niskich energiach.

45 Więcej informacji na temat oddziaływania słabego można znaleźć w słowniku, rozdziale siedemnastym i dodatku B.

46 Przywołane wcześniej książki Close'a i Olmerta zawierają szerokie omówienie oddziaływania słabego.

47 To znaczy te, które moim zdaniem są najbardziej obiecujące – będę je omawiał w rozdziałach 17–21.

48 Książka *Lectures on Classical Differential Geometry* Dirka Struika zawiera interesujące rozważania na temat matematyki sporządzania map. Wzorcowym dziełem, skupiającym się na geometrycznym podejściu do ogólnej teorii względności, jest książka *Gravitation* Charlesa Misnera, Kipa Thorne'a i Johna Wheelera. Klasycznym przedstawieniem tematu skupiającym się na podejściu wykorzystującym pola jest książka Stevena Weinberga *Gravitation and Cosmology*. Chciałbym podkreślić, że między tymi podejściami nie ma sprzeczności i każdy dobry fizyk zawsze ma je oba na uwadze.

49 Uwaga techniczna: aby zmierzyć długość drogi biegnącej w kierunkach innych niż lokalne kierunki północ–południe lub wschód–zachód, należy podzielić ją na mniejsze odcinki, zastosować do każdego z nich twierdzenie Pitagorasa i zsumować otrzymane długości. Im mniejsze będą te odcinki, tym dokładniejszy będzie nasz pomiar.

50 Matematycy i fizycy oznaczają je zwykle symbolami $x_1$, $x_2$, $x_3$ – jest to wprawdzie mniej dziwaczne, ale za to bardziej zagmatwane.

51 *Piękno Wszechświata* Briana Greene'a to popularnonaukowa, entuzjastyczna prezentacja teorii strun.

52 Najnowsze osiągnięcia kosmologii z coraz większą siłą wskazują, że na samym początku swojej historii Wszechświat przeszedł przez okres bardzo szybkiej ekspansji, nazywanej *inflacją*. *Wszechświat inflacyjny* Alana Gutha to doskonała prezentacja teorii inflacji, napisana przystępnym językiem przez jednego z jej twórców. Zgodnie z tą teorią inflacji uległy między innymi fluktuacje kwantowe pola metrycznego. Możliwe, że fluktuacje te, powiększone do rozmiarów kosmologicznych, wciąż jeszcze można wykryć. Planuje się przeprowadzenie ambitnych eksperymentów mających na celu zaobserwowanie tego efektu.

Dokładna przyczyna powstania inflacji (jeśli rzeczywiście do niej doszło) jest nieznana. Jednak dzięki połączeniu dwóch idei omówionych w tym rozdziale można ustalić prawdopodobne jej źródło.

- Mówiliśmy, że pusta przestrzeń jest teraz wypełniona różnymi materialnymi kondensatami. W niezwykle wysokiej temperaturze mogłyby one ulec „stopieniu" lub w inny sposób zmienić swój charakter. Mówimy, że dochodzi w tym przypadku do przejścia fazowego, pojęciowo podobnego do znanego wszystkim przejścia (ciało stałe) lód $\longrightarrow$ (ciecz) woda $\longrightarrow$ (gaz) para wodna; w tym przypadku chodzi jednak o kosmiczne przejścia fazowe. W takim razie zmianie ulegają własności samej przestrzeni, a to pociąga za sobą zmiany praw fizycznych.
- Jedną z cech, które zmieniają się podczas takich kosmicznych przejść fazowych, jest energia kondensatu. Mówiliśmy krótko o tym, że zmiana taka przejawia się jako wkład do ciemnej energii. Jest zatem bardzo możliwe, że bardzo wczesny Wszechświat mógł zawierać dużo większą gęstość ciemnej energii niż obecnie. Również teraz ciemna energia powoduje wzrost tempa rozszerzania się Wszechświata, jest to jednak proces łagodny. Dużo większa jej gęstość na początku istnienia Wszechświata powinna doprowadzić do dużo większego wzrostu tempa ekspansji.

I w ten właśnie sposób mogło dojść do inflacji.

53 Aby uniknąć konieczności wprowadzania naraz zbyt wielu skomplikowanych pojęć, odkładam na razie na bok omówienie innego bardzo interesującego odkrycia astronomicznego, a mianowicie „ciemnej materii". Powrócimy do tego tematu później.

54 W analogii do niem.: Das Wohltemperierte Klavier (przyp. tłum.).

55 W książce *The Extravagant Universe* Mark Kirshner, jeden z najlepszych astronomów, przedstawił osobistą relację z przeprowadzonych obserwacji.

56 Supersymetrię omówimy dokładniej w dalszej części książki, przy okazji przedstawiania zagadnienia unifikacji. W tym miejscu ważne jest jedynie, byśmy zauważyli, że (tak jak zresztą i w pozostałych przypadkach) wynika z niej absurdalnie duży wkład do gęstości.

57 Idee te jasno przedstawił ich zwolennik Leonard Susskind w książce *The Cosmic Landscape*.

# Rozdział 9

# Liczenie materii

*Gra bitów tworzy nasze byty.*

John Wheeler miał dar przekazywania głębokich prawd za pomocą chwytliwych powiedzonek. „Czarna dziura” to chyba najbardziej znane wymyślone przez niego określenie, ale moim ulubionym powiedzeniem jest: „z bitu byt”. Te trzy słowa są inspirującym ideałem dla nauk teoretycznych. Staramy się znaleźć struktury matematyczne doskonale odzwierciedlające rzeczywistość, tak żeby nie umknął im żaden istotny aspekt. Rozwiązując równania, dowiadujemy się, co istnieje i jak się to zachowuje. Tworząc takie odwzorowanie, umieszczamy rzeczywistość w formie, którą potrafimy się posługiwać za pomocą rozumu.

Wyznawcy filozoficznego realizmu twierdzą, że materia ma podstawowe znaczenie – mózg (umysł) jest materialny, a pojęcia powstają właśnie w mózgu. Idealiści utrzymują, że to pojęcia mają zasadnicze znaczenie – mózg jest urządzeniem pojęciowym i takie właśnie urządzenia stwarzają materię. Slogan „z bitu byt” mówi, że nie musimy wybierać jednej z tych dwóch alternatyw. Obie mogą być jednocześnie prawdziwe. Opisują to samo, posługują się jedynie odmiennym językiem.

Najwyższym wyzwaniem dla potwierdzenia prawdziwości frazy „z bitu byt” jest odkrycie struktur matematycznych odzwierciedlających świadomość i elastyczną inteligencję – mówiąc krótko, zaprojektowanie myślących komputerów. Nie udało się tego osiągnąć i wciąż trwają spory, czy jest to w ogóle możliwe[58].

W tym rozdziale opiszę najbardziej imponujący przykład potwierdzenia prawdziwości sloganu „z bitu byt", który *udało się* zrealizować. Algorytmy QCD pozwalają zaprogramować komputery tak, by produkowały masowo protony, neutrony i całe zoo cząstek podatnych na oddziaływanie silne. Zaprawdę, z bitu byt!

W ramach premii uzyskujemy zaś kolejny wheeleryzm: „masę bez masy". Jak pokazały doświadczenia, które omawialiśmy w rozdziale szóstym, elementami składowymi protonów i neutronów są całkowicie bezmasowe gluony i niemal pozbawione masy kwarki. (Kwarki, o których tu mowa – *u* oraz *d* – ważą mniej więcej 1% tego co tworzone przez nie protony).

W laboratorium w Brookhaven na Long Island i w kilku innych ośrodkach na całym świecie istnieją specjalne pomieszczenia, do których rzadko kto wchodzi. Wydaje się, że nic takiego się w nich nie dzieje, nic się tam nie rusza, a jedynym dźwiękiem jest łagodny szum wentylatorów utrzymujących stałą temperaturę i niską wilgotność. W pomieszczeniach tych pracuje około $10^{30}$ protonów i neutronów. Ułożono je w setkach komputerów równolegle realizujących powierzone im zadania. Zespół ten mknie z prędkościami wyrażanymi w teraflopach, to znaczy $10^{12}$ – bilionach – operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę. Pozwoliliśmy im tak pracować przez całe miesiące – $10^{7}$ sekund. W końcu udało się osiągnąć to, co pojedynczy proton ustala co $10^{-24}$ sekundy, czyli doszły do tego, jaki jest najlepszy sposób rozmieszczenia pól kwarkowych i gluonowych gwarantujący zadowolenie Siatki i uzyskanie stabilnej równowagi.

Dlaczego jest to takie trudne?

Bo Siatka jest wymagającą panią.

Mówiąc dokładniej, jest skomplikowana. Targają nią różne nastroje i bywa porywcza.

Mechanika kwantowa operuje funkcjami falowymi odzwierciedlającymi jednocześnie wiele możliwych konfiguracji pól, jednak nasze klasyczne komputery[59] mogą wykonywać w danym momencie tylko jedną operację. Aby odtworzyć oddziaływania wielu

konfiguracji, które w kwantowym opisie są obecne jednocześnie, komputer taki musi:

1. liczyć przez długi czas w celu wytworzenia tych konfiguracji,
2. zapisać je,
3. zestawić swoje zamierzchłe wspomnienia z obecną zawartością pamięci.

Podsumowując, dysponujemy środkami nieadekwatnymi do celów, jakie przed sobą postawiliśmy. Gdy pojawią się komputery kwantowe[60], jeśli w ogóle do tego dojdzie, będziemy być może w lepszej sytuacji. Co więcej, wielkości, które próbujemy obliczyć – obserwowane przez nas cząstki – są niewielkimi zmarszczkami na wzburzonym morzu fluktuującej Siatki. By za pomocą metod numerycznych odnaleźć te cząstki, musimy wymodelować całe morze, a potem poszukiwać niewielkich zaburzeń.

## Składanie modeli w trzydziestu dwóch wymiarach

Gdy byłem małym chłopcem, lubiłem składać – i rozkładać na części – plastikowe modele rakiet. Modele te nie mogły oczywiście wynieść satelity, nie mówiąc już o zawiezieniu kogokolwiek na Księżyc, ale mogłem je trzymać w dłoni, bawić się nimi i pomagały mi puszczać wodze fantazji. Były wykonane wiernie, w odpowiedniej skali, z plastikową figurką człowieka w tej samej skali, mogłem więc uzmysłowić sobie, jakiej są wielkości, dowiedzieć się, czym się różni myśliwiec przechwytujący od rakiety nośnej, i poznać najważniejsze pojęcia, takie jak ciężar użyteczny czy człony rakiety. Modele do składania mogą świetnie bawić i uczyć.

Podobnie gdy próbuje się zrozumieć skomplikowane pojęcia lub równania, dobrze jest mieć pod ręką odpowiednie modele. Dobry model oddaje pewien aspekt rzeczywistości, ale jest jednocześnie na tyle mały, że możemy objąć go umysłem.

W dalszej części rozdziału przedstawię model kwantowej rzeczywistości. W modelu tym dokonano daleko idących uproszczeń, ale myślę, że jest na tyle intrygujący, iż pozwoli na wyobrażenie sobie przepastnej głębi kwantowej rzeczywistości. Celem tego ćwiczenia jest uzmysłowienie sobie, że rzeczywistość kwantowa jest NAPRAWDĘ OLBRZYMIA[61]. Skonstruujemy model opisujący życie towarzyskie spinów zaledwie pięciu cząstek i przekonamy się, że toczy się ono w przestrzeni o trzydziestu dwóch wymiarach.

Zacznijmy od jednej cząstki kwantowej obdarzonej minimalną jednostką spinu. Pomińmy wszystkie jej pozostałe własności. Taki obiekt nazywa się kwantowym bitem, w skrócie kubitem – od ang. *qubit* = *quantum bit*. (Uwaga dla znawców tematu: zimny elektron uwięziony w określonym stanie przestrzennym, powiedzmy przez odpowiednie pola elektryczne, jest w istocie kubitem). Spin kubitu może być skierowany w różne strony. Na oznaczenie stanu, w którym spin kubitu jest ponad wszelką wątpliwość skierowany w górę, będziemy używać symbolu:

$$|\uparrow\rangle$$

natomiast stan, w którym spin ten jest skierowany bez wątpienia w dół, będziemy zapisywać jako:

$$|\downarrow\rangle$$

Kubit może znajdować się również w stanie, w którym jego spin jest skierowany w bok, i właśnie wtedy zaczyna się cała zabawa. To w tym miejscu na pierwszy plan wysuwa się dziwaczność mechaniki kwantowej.

Stany, w których spin jest skierowany w bok, *nie są* nowymi, niezależnymi stanami. Są one, tak samo jak wszystkie pozostałe stany kubitu, złożeniem zdefiniowanych już stanów $|\uparrow\rangle$ oraz $|\downarrow\rangle$.

Na przykład stan, w którym spin jest skierowany na wschód, można zapisać następująco:

$$|\rightarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\rangle$$

Stan, w którym spin jest ponad wszelką wątpliwość skierowany na wschód, stanowi równą mieszankę kierunków północnego i południowego. Jeżeli przeprowadzimy pomiar tego spinu w kierunku poziomym, zawsze uzyskamy odpowiedź, że jest on skierowany na wschód. Jeżeli jednak zmierzymy go w kierunku pionowym, istnieje jednakowe prawdopodobieństwo, że pomiar da wynik „północ" lub „południe". Właśnie o tym mówi nam owo dziwne równanie. Dokładnie rzecz biorąc, zasada obliczania prawdopodobieństwa uzyskania konkretnego wyniku (góra lub dół) w trakcie pomiaru spinu w kierunku pionowym głosi, że należy podnieść do kwadratu liczbę, przez którą jest pomnożony dany stan. W naszym przykładzie stan spinu skierowanego w górę mnożymy przez $1/\sqrt{2}$, więc prawdopodobieństwo, że w trakcie pomiaru stwierdzimy, iż spin jest skierowany w górę, wynosi $(1/\sqrt{2})^2 = 1/2$.

Przykład ten ilustruje w miniaturowej formie, jakie elementy wchodzą w skład opisu układu fizycznego w teorii kwantowej. Stan układu określa jego funkcja falowa. Właśnie mieliśmy okazję zobaczyć funkcje falowe trzech konkretnych stanów. Funkcję falową tworzy zbiór liczb, przez które należy pomnożyć każdą możliwą konfigurację opisywanego obiektu. (Liczba ta może być równa zeru, gdybyśmy więc byli formalistami, moglibyśmy napisać: $|\uparrow\rangle = 1|\uparrow\rangle + 0|\uparrow\rangle$). Liczbę, przez którą mnożymy jakąś konfigurację, nazywamy *amplitudą prawdopodobieństwa* tej konfiguracji. *Kwadrat* amplitudy prawdopodobieństwa jest prawdopodobieństwem zaobserwowania danej konfiguracji.

A jak wygląda funkcja stanu, w którym spin skierowany jest na zachód? Z uwagi na symetrię również powinna ona mieć takie same prawdopodobieństwa zaobserwowania spinu skierowanego w dół i w górę. Oto ona:

$$|\leftarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\rangle$$

Pojawiający się w równaniu znak minus nie wpływa na prawdopodobieństwa, ponieważ obliczamy je przez podniesienie liczb do kwadratu. Jeśli porównamy funkcję spinu skierowanego na wschód ze spinem skierowanym na zachód, stwierdzimy, że prawdopodobieństwa są takie same, ale amplitudy prawdopodobieństw – różne. (Za chwilę, gdy przeanalizujemy kilka spinów jednocześnie, przekonamy się, że z tego znaku minus wynikają pewne konsekwencje).

Rozważmy teraz dwa kubity. By uzyskać stan, w którym obydwa spiny wskazują na wschód, mnożymy przez siebie dwie kopie równania spinu skierowanego na wschód i otrzymujemy:

$$|\rightarrow\rightarrow\rangle = \frac{1}{2}|\uparrow\uparrow\rangle + \frac{1}{2}|\uparrow\downarrow\rangle + \frac{1}{2}|\downarrow\uparrow\rangle + \frac{1}{2}|\downarrow\downarrow\rangle$$

Prawdopodobieństwo, że w czasie pomiaru stwierdzimy, iż obydwa spiny są skierowane do góry, wynosi $(1/2)^2 = 1/4$ i jest ono takie samo jak prawdopodobieństwo stwierdzenia, że pierwszy jest skierowany do góry, a drugi w dół, i tak dalej. Podobnie, gdy obydwa spiny są skierowane na zachód, otrzymujemy:

$$|\leftarrow\leftarrow\rangle = \frac{1}{2}|\uparrow\uparrow\rangle - \frac{1}{2}|\uparrow\downarrow\rangle - \frac{1}{2}|\downarrow\uparrow\rangle + \frac{1}{2}|\downarrow\downarrow\rangle$$

I tak jak wcześniej, wszystkie prawdopodobieństwa zmierzenia różnych kombinacji dwóch kierunków są takie same.

Już w przypadku tych dwóch kubitów możemy zauważyć dosyć pokrętne zachowanie. (Fizycy określają je mianem *splątania kwantowego*). Rozważmy dwa stany, które możemy uzyskać, łącząc parę spinów skierowanych na zachód z parą skierowaną na wschód:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\rightarrow\rightarrow\rangle+\frac{1}{\sqrt{2}}|\leftarrow\leftarrow\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\uparrow\rangle+\frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\downarrow\rangle$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\rightarrow\rightarrow\rangle-\frac{1}{\sqrt{2}}|\leftarrow\leftarrow\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\downarrow\rangle+\frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\uparrow\rangle$$

W każdym z tych stanów z wyrażenia po lewej stronie znaku równości wynika, że jeżeli zmierzymy spiny w kierunku *poziomym*, stwierdzimy, iż obydwa są skierowane albo na zachód, albo na wschód. Każda z tych możliwości może zajść z prawdopodobieństwem 1/2. Nigdy nie odkryjemy, że jeden spin wskazuje na wschód, a drugi na zachód. Jeżeli zatem chodzi o pomiary w kierunku poziomym, obydwa stany wyglądają tak samo. To tak, jak gdybyśmy wiedzieli, że mamy dwie dobrane do pary skarpetki, nie wiedzielibyśmy tylko, jakiego są koloru: czarne czy białe. To wszystko możemy wyczytać z wyrażenia po lewej stronie równań.

Prawa strona mówi o tym, co się stanie, gdy w przypadku tych samych stanów zmierzymy obydwa spiny w kierunku pionowym. Teraz wyniki są inne. W przypadku pierwszego stanu obydwa spiny będą skierowane albo w górę, albo w dół – każda z tych sytuacji może zajść z prawdopodobieństwem 1/2. Poprzednio (w poprzednim akapicie!) drugi stan wyglądał tak samo jak pierwszy. Teraz, oglądany z innej perspektywy, jest zupełnie inny. W przypadku drugiego stanu *nigdy* nie stwierdzimy, że obydwa spiny są zwrócone w tym samym kierunku pionowym; jeżeli jeden z nich będzie skierowany w górę, drugi będzie zwrócony w dół.

Dowolny z tych stanów zdenerwowałby Einsteina, Podolskiego i Rosena, ponieważ są one wspaniałym przykładem słynnego paradoksu EPR[62]. Jeżeli zmierzymy spin pierwszego kubitu, będziemy wiedzieli, jaki uzyskamy wynik po zmierzeniu drugiego, nawet w sytuacji gdyby oba kubity były od siebie fizycznie znacznie oddalone. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że to „przerażające działanie na odległość”, jak nazywał je Einstein, umożliwia przesyłanie informacji (pierwszy spin powiadamia drugi, w którym

kierunku ma się ustawić) z prędkością większą od prędkości światła. Okazuje się to jednak iluzją, ponieważ aby obydwa kubity znalazły się w określonym stanie, muszą na początku być blisko siebie. Później możemy je od siebie oddalić, ale jeżeli kubity nie mogą poruszać się szybciej od światła, również żadna wiadomość, którą ze sobą niosą, nie może zostać przesłana z prędkością większą od prędkości światła.

Uogólniając, aby skonstruować wszystkie możliwe stany dwóch kubitów, dodajemy do siebie cztery możliwości $|\uparrow\uparrow\rangle$, $|\uparrow\downarrow\rangle$, $|\downarrow\uparrow\rangle$, $|\downarrow\downarrow\rangle$ i każdą z nich mnożymy przez oddzielną liczbę. Tym samym zdefiniowaliśmy czterowymiarową przestrzeń – możemy odmierzać odległości w czterech różnych kierunkach[63].

Opisując możliwe stany pięciu kubitów, uwzględniamy możliwości góra/dół dla każdego z nich (na przykład: $|\uparrow\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow\rangle$ lub $|\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\rangle$). Mamy $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32$ takich możliwości i ogólny stan może zawierać je wszystkie, każdą pomnożoną przez odpowiednią liczbę. W ten sposób dostaliśmy do rąk trzydziestodwuwymiarowy model[64]. To dopiero model!

## Demon Laplace'a kontra chaos Siatki

Pięciotomowe arcydzieło Pierre-Simona Laplace'a – *Mécanique céleste* – ukazywało się w częściach w latach 1799–1825. Dzięki niemu astronomia matematyczna, oparta na zasadach Newtona, wzniosła się na nowy poziom elegancji i dokładności. Laplace był pod tak dużym wrażeniem dokładności, z jaką udało mu się wyliczyć ruchy ciał niebieskich, że puszczając wodze fantazji, zastanawiał się, co mógłby osiągnąć demon obliczeniowy posiadający pełną wiedzę. Doszedł do wniosku, że demon taki za pomocą rachunków mógłby przewidzieć przyszłość lub odtworzyć przeszłość:

> Inteligencja, która w danym momencie znałaby wszystkie siły rządzące naturą i położenie tworzących ją bytów, gdyby miała

> odpowiednio duże rozmiary, tak by mogła poddać te dane analizie, i gdyby potrafiła uchwycić w tym samym wzorze ruchy zarówno największych ciał Wszechświata, jak i najlżejszych atomów – dla takiej istoty nie istniałaby żadna niepewność, a przyszłość, tak samo jak przeszłość, byłaby niczym otwarta księga przed jej oczyma.

Laplace miał oczywiście na myśli Wszechświat oparty na newtonowskiej mechanice. Czy jego demon jest dzisiaj wciąż realistyczny? Czy pełna wiedza na temat stanu obecnego i nieograniczone umiejętności przeprowadzania obliczeń matematycznych mogłyby zredukować przeszłość i przyszłość do odpowiednich rachunków?

Chaos Siatki pokonuje demona Laplace'a.

Przyjrzyjmy się najpierw problemowi, któremu demon Laplace'a musi stawić czoła. Laplace uważał, że określenie położenia i prędkości każdego atomu na świecie jest równoznaczne z określeniem świata. Nic poza tym nie musimy wiedzieć. Sądził też, że fizyka daje nam równania łączące pełny zbiór położeń i prędkości w jednym momencie z odpowiadającymi im zbiorami w chwili późniejszej (lub wcześniejszej). Gdybyśmy zatem znali stan świata w chwili $t_0$, moglibyśmy obliczyć jego stan w dowolnym innym czasie $t_1$.

Wraz z powstaniem współczesnej teorii kwantowej świat stał się dużo większy, niż Laplace mógł sobie wyobrażać. Nasz model obejmował jedynie garść kubitów[65], ale i tak wyznaczał trzydziestodwuwymiarowy świat. Kwantowa Siatka, będąca ucieleśnieniem naszego najgłębszego zrozumienia rzeczywistości, wymaga, żeby *w każdym punkcie czasu i przestrzeni znajdowało się wiele kubitów*. Kubity w danym punkcie opisują różne zjawiska, które mogą się w nim wydarzyć. Jeden z nich na przykład opisuje prawdopodobieństwo zaobserwowania elektronu ze spinem skierowanym w górę albo w dół, inny – prawdopodobieństwo zaobserwowania antyelektronu ze spinem zwróconym w górę lub w dół, jeszcze inny – prawdopodobieństwo zaobserwowania

czerwonego kwarka *u* ze spinem skierowanym w górę lub w dół… Kolejne opisują możliwe wyniki zaobserwowania fotonów, gluonów lub innych cząstek. Dodatkowo, jeżeli przestrzeń i czas są ciągłe – jak z dużym sukcesem zakładają obecne prawa fizyki – to liczba punktów czasoprzestrzeni jest wysoce nieskończona[66].

Świat nie opiera się już na atomach istniejących w pustce i tym samym stan świata nie jest już określony przez położenia i prędkości olbrzymiej liczby atomów. Świat jest ogromną, zwielokrotnioną nieskończonością kubitów, którą właśnie opisaliśmy. Aby opisać jego stan, musimy przypisać liczbę – amplitudę prawdopodobieństwa – każdej możliwej konfiguracji kubitów. W przypadku naszego modelu obejmującego pięć kubitów przekonaliśmy się, że możliwe stany wypełniają trzydziestodwuwymiarową przestrzeń. Przestrzeń, którą należy się posłużyć do opisu stanu Siatki stanowiącej nasz świat, wprowadza nieskończenie wiele nieskończoności.

Googol jest liczbą równą $10^{100}$ – to znaczy, jedynce ze stu zerami. Myślano, że jest to niedorzecznie duża liczba. Googol jest na przykład większy od liczby atomów w obserwowalnym Wszechświecie. Jednak nawet jeśli zastąpimy całą przestrzeń siatką wyznaczającą jedynie dziesięć punktów w każdym kierunku i w każdym z jej węzłów umieścimy jeden kubit, *liczba wymiarów* kwantowomechanicznej wersji takiego schematycznego modelu świata będzie dużo większa od googola. Będzie to tak naprawdę przestrzeń o liczbie wymiarów przekraczającej googol googoli.

Pierwsza część zadania postawionego przed demonem – poznanie „położenia bytów tworzących" świat – stanowi więc nie lada orzech do zgryzienia. By poznać stan świata, musi on zlokalizować określony punkt w NAPRAWDĘ OLBRZYMIEJ przestrzeni. W porównaniu z tym znalezienie igły w stogu siana to błahostka.

Tak naprawdę sprawy przybierają jeszcze gorszy obrót. Mówiliśmy już o spontanicznej aktywności Siatki. Pełno w niej kwantowych fluktuacji, czyli wirtualnych cząstek. Obraz taki jest przybliżonym, nieformalnym opisem rzeczywistości, którą teraz potrafimy wyrazić dokładniej. Mówiąc, że w Siatce dochodzi do spontanicznej aktywności, mamy na myśli to, iż jej stan nie jest prosty. Jeśli

popatrzymy z dużą rozdzielczością w przestrzeni i czasie na to, co się dzieje w bycie, który zwiemy pustą przestrzenią (na przykład tak, jak to uczynili fizycy doświadczalni w LEP), uzyskamy wiele możliwych wyników. Za każdym razem gdy spojrzymy, ujrzymy coś innego. Każda obserwacja odkrywa fragment funkcji falowej opisującej typowy, bardzo mały obszar przestrzeni. Każdy uzyskany wynik jest ucieleśnieniem jednej z możliwości występującej w iloczynie z odpowiednią amplitudą prawdopodobieństwa wewnątrz tej funkcji falowej.

Szukamy zatem igły, która nie kryje się na spodzie stogu siana ani w żadnym innym określonym miejscu. Jest gdzieś z boku, a raczej należy jej szukać gdzieś w bok w tę stronę i bliżej skraju w tamtą stronę oraz na boku w kolejną stronę i tak dalej przez różną liczbę googoli googoli stron.

Wymyślony przez Laplace'a demon ma dar posiadania doskonałej wiedzy na temat stanu świata. On wie, gdzie znajduje się owa igła, ale jest wymyślony. Ci z nas, którym nie jest dana doskonała wiedza na temat stanu świata, a mimo to chcieliby przewidzieć, co się wydarzy w przyszłości, muszą się zmierzyć z pewnymi trudnościami. W jaki sposób możemy zdobyć część potrzebnej wiedzy? Jakie znaczenie będą miały luki w posiadanej informacji?

Yogi Berra nauczył się najwyraźniej od Nielsa Bohra, że „przewidywanie jest bardzo trudne, zwłaszcza gdy dotyczy przyszłości". Istnieją (przynajmniej) dwa fundamentalne powody, dla których przewidywanie przyszłości może się okazać bardzo trudne, nawet jeżeli będziemy znali wszystkie odpowiednie równania. Jednym z nich jest teoria chaosu. Mówiąc w przybliżeniu, zgodnie z tą teorią małe nieścisłości w wiedzy na temat stanu w chwili $t_0$ pociągają za sobą poważną niepewność odnośnie do tego, co możemy wydedukować na temat stanu świata w znacznie późniejszym czasie $t_1$.

Drugim powodem jest teoria kwantowa. Jak już wspomnieliśmy, teoria ta najczęściej podaje prawdopodobieństwa, a nie stwierdza, co się wydarzy na pewno. Właściwie daje nam ona doskonale zdefiniowane równania opisujące, jak funkcja falowa zmienia się

w czasie. Gdy jednak posłużymy się funkcją falową, by przewidzieć, co zaobserwujemy, uzyskamy jedynie zbiór prawdopodobieństw otrzymania poszczególnych wyników.

Mając to wszystko na uwadze, staliśmy się bardziej pokorni niż w czasach Laplace'a, jeśli chodzi o to, co możemy wyliczyć – nawet w zasadzie. W praktyce jednak potrafimy odpowiadać na pytania, których Laplace nie umiał sobie nawet wyobrazić, wykorzystując w tym celu środki, które mu się nawet nie śniły. Na przykład…

## Wielkie obliczanie

Dobrze poinformowane współczesne demony rachunkowe wiedzą, że nie mogą po prostu wszystkiego wyliczyć, w duchu demona Laplace'a. Ich sztuka polega na odkrywaniu aspektów rzeczywistości nadających się do analizy za pomocą znanych im technik obliczeniowych. Na szczęście przypadek, niepewność i chaos nie przenikają każdego aspektu świata przyrody. Wiele z tego, co najbardziej chcielibyśmy wyliczyć, na przykład kształt cząsteczki przydatnej w leczeniu, wytrzymałość materiału używanego do budowy samolotu czy masa protonu, jest stałą cechą rzeczywistości. Co więcej, układy te można rozważać oddzielnie; ich własności nie zależą w istotnym stopniu od reszty świata[67]. W sztuce obliczeniowych demonów stabilne, wyizolowane układy są naturalnymi tematami do kreślenia szczegółowych portretów.

Zatem: w pełni świadomi trudności, ale nimi niezrażeni, bohaterscy fizycy zbierają się w sobie, składają wnioski o przyznanie środków na badania, kupują klastry komputerowe, lutują, programują, usuwają błędy z programów, ba, myślą nawet – robią wszystko, co konieczne, żeby wydrzeć odpowiedzi z chaosu Siatki.

W jaki sposób wylicza się portret protonu?

Po pierwsze, musimy zastąpić ciągłą przestrzeń i czas skończoną strukturą – siatką punktów – którą można przetwarzać w komputerze. Jest to oczywiście przybliżenie, ale jeżeli tylko odległość między punktami pozostanie wystarczająco mała, błędy nie

będą duże[68]. Po drugie, musimy ścisnąć ową NAPRAWDĘ OLBRZYMIĄ kwantową rzeczywistość tak, by zmieściła się w klasycznym urządzeniu obliczeniowym. Kwantowomechaniczny stan Siatki zajmuje ogromną przestrzeń, w której jego funkcja falowa obejmuje mnóstwo możliwych wzorców aktywności. Komputer potrafi jednak operować zaledwie kilkoma wzorcami naraz. Ponieważ równania opisujące zmianę w czasie dowolnego wzorca aktywności wykorzystują wszystkie pozostałe wzorce, klasyczny komputer musi przechowywać w pamięci przepastną bibliotekę takich wzorców razem z ich amplitudami prawdopodobieństwa. Aby dokonać ewolucji w czasie bieżącego wzorca, krok po kroku pobiera odpowiednie informacje na temat starych wzorców. Dla każdego zapamiętanego wzorca wylicza wnoszone przez niego zmiany. W końcu zapisuje wyliczoną nową amplitudę prawdopodobieństwa bieżącego wzorca, zabiera się do obliczania zmian kolejnego i cały ten proces wielokrotnie powtarza. Siatka jest wymagającą panią.

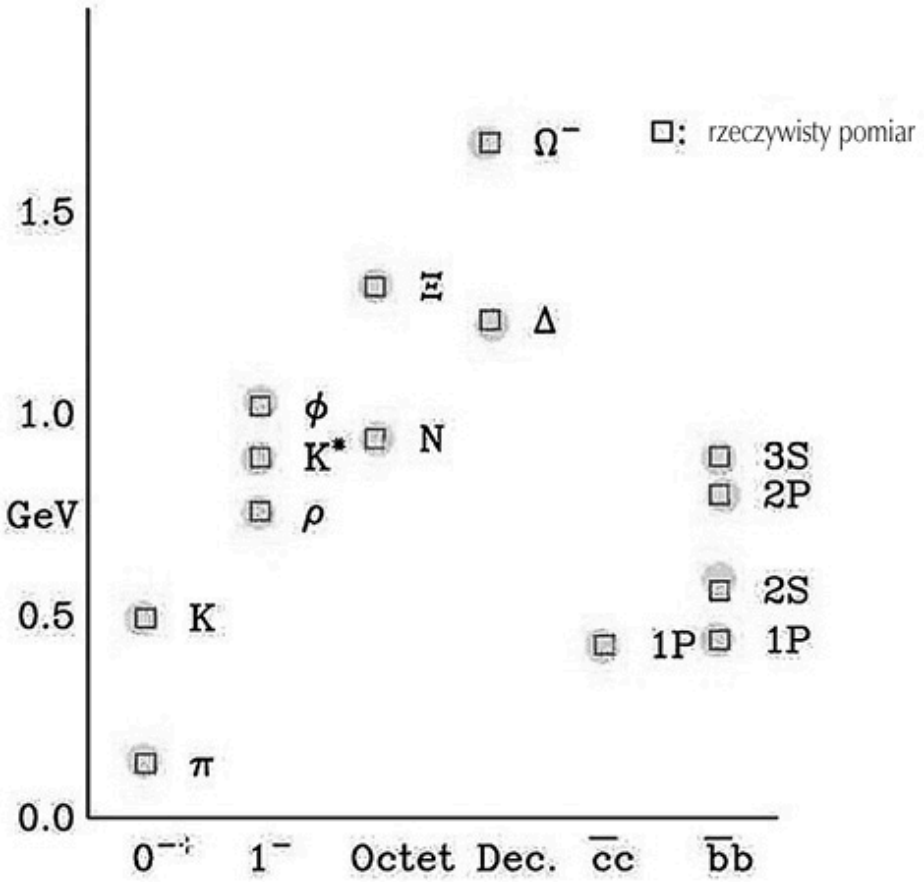
Ewolucja nie przystosowała naszych oczu do obserwacji odległości rzędu $10^{-14}$ centymetra ani naszych mózgów do zauważania czasów rzędu $10^{-24}$ sekundy. Takie umiejętności nie pomogłyby nam w uciekaniu przed drapieżnikami czy w poszukiwaniu ponętnego partnera lub partnerki. Jednak komputery przetwarzające kolejno konfiguracje Siatki tworzą wzorce, które nasze oczy zobaczyłyby, gdyby były przystosowane do obserwowania takich niewielkich odległości i czasów. Posługując się szarymi komórkami, możemy wyostrzyć wzrok. W ten sposób uzyskaliśmy obraz przedstawiony na rycinie nr 4 kolorowej wkładki.

Skoro udało nam się ustalić, że „pusta” przestrzeń brzęczy, możemy ją szarpnąć. To znaczy, możemy zakłócić Siatkę, wprowadzając jakąś dodatkową aktywność, i pozwolić, żeby wszystko powróciło do normy. Jeżeli znajdziemy stabilne, wyraźnie umiejscowione skupiska energii, będziemy wiedzieli, że odkryliśmy – to znaczy, wyliczyliśmy – stabilne cząstki. Możemy dopasować je (jeśli teoria jest poprawna!) do protonów *p*, neutronów *n* i pozostałych cząstek. Jeśli spostrzeżemy wyraźnie umiejscowione skupiska energii, które utrzymują się przez dobrą chwilę, a potem

rozpraszają, będziemy wiedzieli, że znaleźliśmy cząstki niestabilne. Powinny one pasować do mezonu $\rho$, barionu $\Delta$ i ich krewniaków.

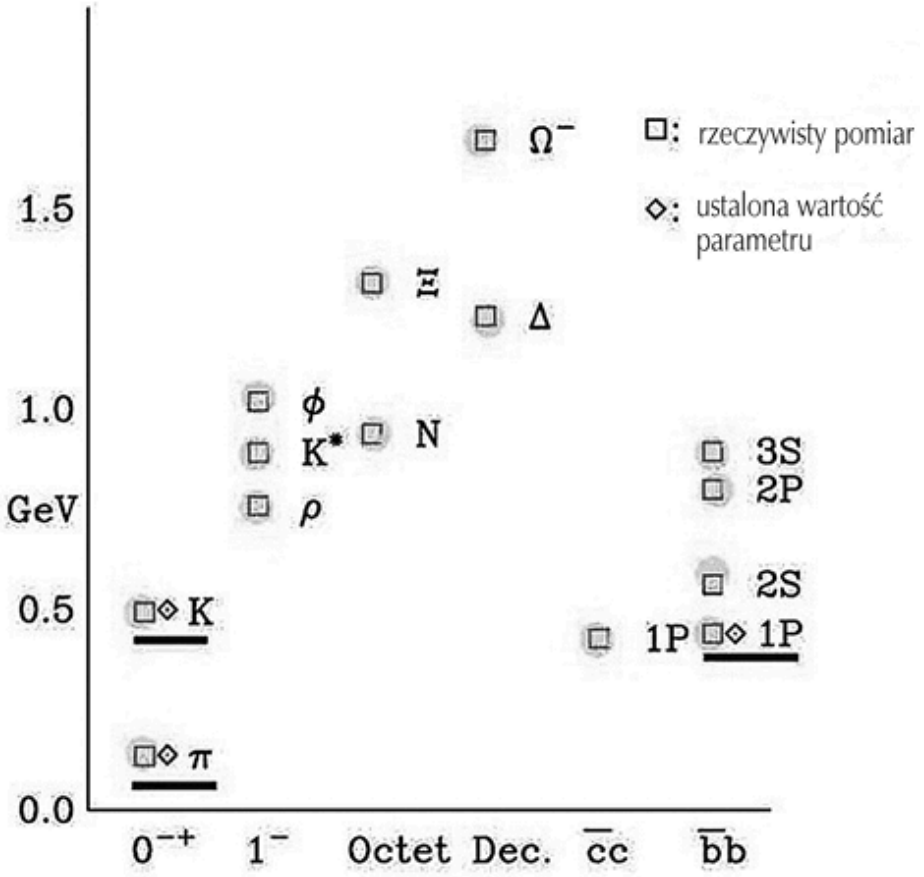
By zobaczyć, jak to wygląda, spójrzcie na rycinę nr 6 kolorowej wkładki i przeczytajcie zamieszczony pod nią podpis. Takie jest nasze najgłębsze rozumienie tego, czym są $p$, $n$, $\rho$, $\Delta$…

Na rysunku 9.1 pokazano bardzo konkretne wyzwanie, któremu musimy sprostać. Jest to część spektrum hadronów, cząstek podatnych na oddziaływanie silne, które udało się zaobserwować. Kluczowymi cechami umożliwiającymi ich identyfikację są masa i spin. W podpisie pod rysunkiem podano szczegółowe informacje na temat tego, co widać na wykresie. Szczegóły te (a jest ich jeszcze dużo więcej!), tak wiele mówiące ekspertom, są dosyć zawiłe, nam wystarczy jednak, jeżeli zrozumiemy po prostu, że teoria musi wyjaśnić wiele ciekawych faktów.



Rysunek 9.1. Spin cząstek podatnych na oddziaływanie silne, które musi wyjaśnić teoria QCD. Każdy punkt przedstawia jakąś zaobserwowaną cząstkę. Wysokość punktu oznacza masę tej cząstki. Pierwsze dwie kolumny to mezony o spinie 0: $\pi$, $K$ oraz o spinie 1: $\rho$, $K^*$, $\varphi$. W trzeciej i czwartej kolumnie znajdują się bariony o spinie 1/2: $N$, $\Xi$ oraz o spinie 3/2: $\Delta$, $\Omega$. W piątej i szóstej kolumnie umieszczono mezony o różnych spinach: „kwarkonia powabne" oraz „kwarkonia niskie". Mezony te interpretuje się jako stany związane ciężkiego kwarka powabnego (oznaczanego symbolem *c* – od ang. *charmed*) i jego antykwarka oraz kwarka niskiego (oznaczanego symbolem *b* – od ang. *bottom*) i jego antykwarka. W tych kolumnach wysokość odpowiada różnicy mas między daną cząstką a najlżejszym możliwym stanem kwarkonium powabnego lub niskiego.

Na rysunku 9.2 pokazano, jak trzy spośród tych zmierzonych mas posłużyły do wyznaczenia wartości parametrów w teorii QCD. Chodzi o to, że przed wykonaniem obliczeń nie wiemy, jakie masy powinniśmy przypisać kwarkom czy ogólnej stałej sprzężenia. Najdokładniejszym sposobem ustalenia tych wartości jest samo przeprowadzenie obliczeń. Próbujemy zatem różnych wartości i pozostajemy przy tych, które pozwalają uzyskać największą zgodność z obserwacjami.

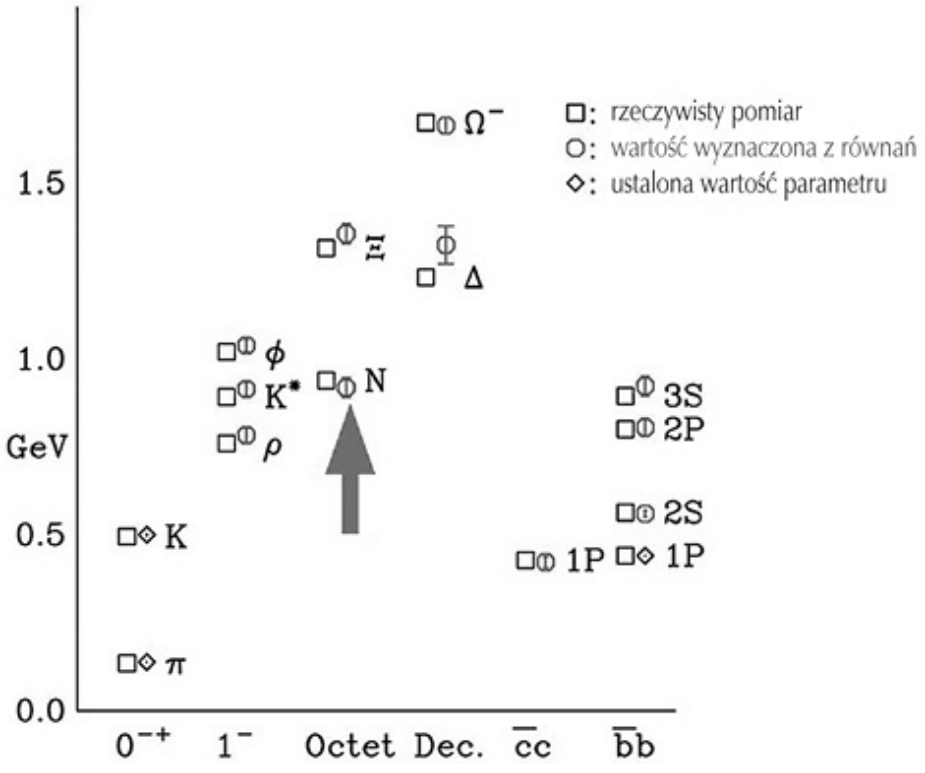



Rysunek 9.2. Do ustalenia wartości parametrów teorii QCD wykorzystano trzy masy. Te trzy masy cząstek są zatem dane, a nie wyznaczone z obliczeń. Kiedy się jednak już tego dokona, nie pozostaje żadne pole manewru.

Jeżeli jakaś teoria ma wiele parametrów, należy ustalić ich wartości, dopasowując wiele danych, a wtedy teoria tak naprawdę nie przewiduje tych liczb, lecz jedynie je uwzględnia[69]. Mówiąc o takich technikach, uczeni używają określeń typu: *dopasowanie krzywej* lub *parametr swobodny*. W uszach naukowców nie brzmią one jak komplementy. Z kolei jeżeli jakaś teoria ma jedynie kilka parametrów, a można ją wykorzystać, by przewidzieć wartości dużej liczby danych, wtedy pokazuje swoją moc. Możemy użyć niewielkiego podzbioru zmierzonych wielkości do ustalenia wartości parametrów, a następnie przewidzieć jednoznacznie wyniki wszystkich pozostałych pomiarów.

W takim obiektywnym sensie chromodynamika kwantowa jest rzeczywiście bardzo potężną teorią. Nie tylko nie wymaga wielu parametrów, ale wręcz *nie dopuszcza*, by było ich dużo: tylko masa każdego rodzaju kwarka i jedna powszechna wartość stałej sprzężenia. Co więcej, z uwagi na dokładność, z jaką potrafimy wyliczyć masy cząstek wymienionych na rysunku, większość mas kwarków nie ma znaczenia dla tych obliczeń – inne efekty są źródłem dużo większych niepewności. Potrzebna jest jedynie średnia masa $m_{\text{lekka}}$ najlżejszych kwarków *u* oraz *d* i masa $m_s$ kwarka dziwnego, a do tego wartość sprzężenia. Po ustaleniu tych trzech danych nie pozostaje żadne pole manewru – nie ma żadnych parametrów swobodnych, wymówek, żadnej kryjówki. Jeżeli teoria jest poprawna, obliczenia zgodzą się z rzeczywistością. Jeżeli wyznaczone wartości nie będą zgodne z wynikami doświadczeń, będziemy wiedzieli, że teoria jest błędna, i w żaden sposób nie da się jej naprawić.

Na rysunku 9.3 pokazano porównanie wyliczonych wartości masy i spinu – jednoznacznych przewidywań teorii QCD – z wartościami zmierzonymi w czasie doświadczeń. Ponieważ spin przyjmuje wartości dyskretne, przy porównaniu będą się one albo zgadzały, albo nie. Dobrze by więc było, żeby zaobserwowane cząstki miały dokładnie takie spiny, jakie wynikają z przewidywań teorii, i w przybliżeniu takie same masy. Możemy odetchnąć z ulgą – w pobliżu prawie każdego kwadratu przedstawiającego wartość z „pomiaru rzeczywistego” na rysunku można odnaleźć albo kółko oznaczające wartość „wyliczoną”, albo romb mówiący o tym, że wartość tę wykorzystano do „ustalenia wartości parametru”. Zauważmy, że wyznaczone z równań masy całkiem dobrze zgadzają się z wartościami uzyskanymi z obserwacji. Zwróćmy uwagę na pionowe „przedziały błędu” zaznaczone wokół wartości wyliczonych. Odzwierciedlają one niepewność, której nie udało się pozbyć z obliczeń. Z powodu ograniczonej mocy obliczeniowej – fantastycznie dużej, to prawda, ale jednak skończonej – trzeba było dokonać różnych uproszczeń i pójść na kilka kompromisów.




Rysunek 9.3. Porównanie obserwowanych i przewidywanych wartości spinu i mas cząstek.

Zwróćcie uwagę na punkt oznaczony literą N na rysunku. Symbol ten oznacza nukleon – czyli proton albo neutron. (W zastosowanej skali ich masy są nierozróżnialne). Chromodynamika kwantowa pozwala poprawnie wyprowadzić z pierwszych zasad masy protonów i neutronów. Cząstki te z kolei są źródłem masy przeważającej części zwykłej materii. Obiecałem wcześniej, że wyjaśnię pochodzenie 95% masy zwykłej materii, prawda? Oto wyjaśnienie.

Równie niezwykłe jest to, czego *nie widać* w wynikach obliczeń komputerowych. Na rysunku nie ma dodatkowych kółek rozrzuconych w różnych miejscach, które oznaczałyby przewidywane, ale nieodkryte jeszcze cząstki. Szczególnie zwróćmy uwagę na fakt, że chociaż podstawowymi wartościami wejściowymi w obliczeniach są własności kwarków i gluonów, cząstki te nie pojawiają się w wynikach. Zasada Uwięzienia, która wydawała się

tak dziwna i sklecona naprędce, tutaj okazuje się przypisem do pełnego i wyczerpującego porównania teorii z rzeczywistością.

Oczywiście wyliczenie czegoś – albo wykorzystanie gigantycznych superszybkich komputerów do przeprowadzenia rachunków – nie oznacza zrozumienia, co się liczy. Zrozumienie będzie naszym celem w następnym rozdziale.

Zanim jednak zakończymy ten, chciałbym się jeszcze na chwilę zatrzymać przy tym prostym rysunku 9.3 i skierować kilka słów uznania pod adresem społeczności, dzięki której powstał. Dzięki trudnym obliczeniom przeprowadzonym z morderczą dokładnością, która wymagała wykorzystania pełnej mocy współczesnej techniki komputerowej, uczeni ci wykazali, że niedające się naginać równania o wysokiej symetrii wyjaśniają przekonująco, i to z dużą precyzją, istnienie protonów i neutronów oraz ich własności. Pokazali, jakie jest pochodzenie masy protonów, a tym samym lwiej części *naszej* masy. Uważam, że jest to jedno z największych osiągnięć naukowych wszech czasów[70].

58 Oczywiście, że tak.

59 Kroki te opisują, co trzeba zrobić, by rozwiązać równania wprost. Znamy jednak pewne sprytne sztuczki pozwalające w szczególnych przypadkach pominąć niektóre z kroków. Noszą one takie nazwy jak euklidesowa teoria pola, funkcja Greena dla metody Monte Carlo, ewolucja stochastyczna i tak dalej. Są to kwestie czysto rachunkowe, wykraczające całkowicie poza ramy tej książki. Postęp w rozwiązywaniu równań mechaniki kwantowej mógłby zmienić świat, pozwalając zastąpić doświadczenia w obszarze chemii i materiałoznawstwa odpowiednimi obliczeniami. Postęp w technikach obliczeniowych związanych z aerodynamiką pozwolił na zrealizowanie tego celu w przypadku projektowania samolotów, dzięki czemu obecnie nowe konstrukcje bardzo często testuje się numerycznie, unikając żmudnego cyklu budowy prototypów i przeprowadzania testów w tunelach aerodynamicznych.

60 Dwa kierunki spinu – góra lub dół – można interpretować jako zera i jedynki, mogą więc pełnić funkcję bitów. Na kilku kolejnych stronach powiemy jednak wiele na temat tego, że stan kwantowy zbioru spinów może opisywać jednocześnie wiele różnych układów spinów. Można sobie zatem wyobrazić jednoczesne przeprowadzanie operacji na wielu różnych konfiguracjach spinów. Jest to pewien

rodzaj przetwarzania równoległego wspierany przez prawa fizyki. Wydaje się, że Przyroda jest w tym bardzo dobra, bo przecież niezwykle szybko i bez większego wysiłku rozwiązuje równania mechaniki kwantowej.

My aż tak biegli nie jesteśmy, przynajmniej na razie. Problem w tym, że różne konfiguracje spinów w różny sposób oddziałują ze światem zewnętrznym i to burzy porządek równoległych obliczeń, które chcielibyśmy przeprowadzić. Trudność w konstrukcji kwantowego komputera polega na tym, że nie możemy dopuścić do interakcji spinu ze światem zewnętrznym lub musimy znaleźć jakiś sposób na wprowadzenie odpowiednich poprawek równoważących to oddziaływanie. Moglibyśmy też wytworzyć obiekty mniej delikatne niż spiny, ale funkcjonujące według takich samych co one zasad. Badania w tym obszarze cały czas trwają; nie pojawił się jeszcze projekt, który mógłby gwarantować odniesienie sukcesu.

61 Jeżeli wolicie pominąć przyprawiające o zawrót głowy szczegóły i jesteście gotowi uwierzyć mi na słowo, możecie od razu przejść do podrozdziału „Wielkie obliczanie”.

62 W książkach poświęconych podstawom mechaniki kwantowej przedstawiono bardziej przemawiające do wyobraźni, ilościowe przykłady paradoksu EPR, wykorzystujące pojęcia takie jak nierówność Bella i stany Greenbergera–Horne’a–Zeilingera. Dobrym, zrozumiale napisanym podręcznikiem tego rodzaju jest książka Roberta Griffithsa *Consistent Quantum Theory*. Ukazało się bardzo dużo książek poświęconych różnym interpretacjom mechaniki kwantowej, sprawdzaniu poprawności jej podstawowych elementów i tym podobnym. Moim skromnym zdaniem, jeśli widzi się drapacz chmur, który przez całe dziesięciolecia trzyma pion i przetrwał nawet potężne bombardowanie, to powinno się przyjąć, że jego fundamenty są niezwykle solidne, nawet jeśli nie można ich łatwo dostrzec. Co prawda zasada zachowania masy też wydawała się kiedyś niewzruszona…

63 Aby uniknąć ewentualnego nieporozumienia, zauważmy, że przy takim podejściu północ i południe liczą się jako jeden kierunek – odmierzenie jednego kilometra na południe jest równoznaczne odmierzeniu minus jednego kilometra na północ.

64 Tę uwagę zamieszczam wyłącznie dla znawców tematu. Nieznormalizowane amplitudy opisują przestrzeń o trzydziestu dwóch *zespolonych* wymiarach. Odpowiada to sześćdziesięciu czterem wymiarom rzeczywistym. W procesie normalizacji stanu gubimy dwa z nich. Tak naprawdę mamy tutaj zatem do czynienia z przestrzenią sześćdziesięciodwuwymiarową.

65 Po jednym na każdy palec dłoni.

66 Skonstruowanie kontinuum kwantowego jest tak trudne, że kusi nas myśl, iż powinniśmy się go w jakiś sposób pozbyć. Wybitnymi zwolennikami tego poglądu są Edward Fredkin i Steven Wolfram.

Nie ulega wątpliwości, że mało wyrafinowane rozwiązania w tym przypadku się nie sprawdzają. Nie wdając się w spór, powiem jedynie – bez obawy, iż spotka się to ze sprzeciwem – że żadna z idei różniących się w istotny sposób od teorii Rdzenia nie doprowadziła do powstania alternatywnej teorii, która choć w przybliżeniu byłaby tak kompletna, ścisła i dokładna. Równocześnie niepokojem napawa fakt, że w najbardziej podstawowych prawach fizycznych pojawiają się procesy graniczne (a zatem w zasadzie nieskończenie długie obliczenia). Czy jednak rzeczywiście tak jest? Wcale nie jestem do końca przekonany, że pojawią się prawdziwe nieskończoności, jeśli będziemy kierować pod adresem teorii jedynie takie pytania, które możemy zadać również w trakcie doświadczenia. Przeprowadzając eksperyment, dysponujemy jedynie ograniczonym czasem i energią, a pomiarów możemy dokonać wyłącznie z pewną skończoną dokładnością. A przecież wykonując *przybliżone* obliczenia, nie musimy tak naprawdę wyliczać granicy!

Od zastanawiania się nad tym wszystkim zaczyna mi się kręcić w głowie, lepiej więc zakończę już ten przypis.

67 A przynajmniej taka jest nasza hipoteza robocza, której zasadność potwierdzają odnoszone sukcesy.

68 Chciałbym poświęcić tę krótką i niezbyt istotną uwagę bardzo ważnej, choć związanej z obliczeniami kwestii pojęciowej. Być może martwią was błędy wynikające z zastąpienia ciągłej czasoprzestrzeni dyskretną siatką. W przypadku wielu analiz naukowych, takich jak przewidywanie pogody czy modelowanie klimatu, jest to olbrzymi problem. Jednak tym razem, za sprawą swobody asymptotycznej, sytuacja nie jest taka zła. Ponieważ kwarki i gluony ulegają wpływowi oddziaływania słabego na małych odległościach, możemy obliczyć analitycznie – czyli z ołówkiem w ręce – jaki efekt będzie miało zastąpienie ich prawdziwych oddziaływań wartościami uśrednionymi, przypisanymi do poszczególnych punktów siatki. Dzięki temu możemy później wprowadzić odpowiednie poprawki.

69 Od wartości $m_{\text{lekka}}$ w największym stopniu zależy masa pionu $m_{\Pi}$ ; z kolei wartość masy $m_{\text{s}}$ wywiera najsilniejszy wpływ na masę kaonu $m_{\text{K}}$, a względna masa $\Delta M_{1\text{P}}$ stanu 1P kwarkonium niskiego najbardziej zależy od siły sprzężenia – dlatego pomiary mas $m_{\Pi}$, $m_{\text{K}}$ i $\Delta M_{1\text{P}}$ wykorzystuje się do ustalenia wartości tych parametrów.

70 Nie ukazała się dotąd żadna popularnonaukowa książka poświęcona numerycznej kwantowej teorii pola (zwanej również sieciową teorią cechowania) i jak sądzę, nigdy się nie ukaże. Chociaż niektóre z uzyskanych wyników można opisać dosyć prosto, tak jak ja to uczyniłem, zrozumienie szczegółów wymaga już jednak przygotowania uniwersyteckiego. Dobre wprowadzenie w tę tematykę jest dostępne (za darmo!) w internecie pod adresem: http://eurograd.physik.uni-tuebingen.de/ARCHIV/Vortrag/Langfeld-latt02.pdf.

# Rozdział 10

# Pochodzenie masy

*Umiejętność obliczenia czegoś nie oznacza jeszcze, że to rozumiemy. Fakt, iż komputery wyliczyły nam, skąd się bierze masa, jest być może przekonujący, ale z pewnością niesatysfakcjonujący. Na szczęście możemy to również zrozumieć.*

To, że komputer wyrzucił z siebie odpowiedź po gigantycznych i całkowicie niejasnych obliczeniach, nie zaspokaja naszego głodu wiedzy. A co by go zaspokoiło?

Paul Dirac słynął z małomówności, ale gdy się już odzywał, jego słowa miały często głębokie znaczenie. Kiedyś powiedział: „Uważam, że rozumiem jakieś równanie dopiero wtedy, gdy potrafię przewidzieć zachowanie jego wyników bez rozwiązywania go".

Na czym polega wartość takiego zrozumienia?

„Rozwiązywanie" równań to tylko jedno z narzędzi – do tego niedoskonałe – do pracy z nimi. Obliczenia, które omówiliśmy w poprzednim rozdziale, są dobrym tego przykładem. Dowodzą one ponad wszelką wątpliwość, że równania na Siatkę kwarków i gluonów dokładnie wyjaśniają masy protonów, neutronów i innych hadronów. Pokazują również, że równania te trzymają kwarki i gluony w ukryciu. (Można traktować niepojawianie się swobodnych kwarków i gluonów jako obliczenie *ich* mas, jeśli doda się ich obłoki cząstek wirtualnych – odpowiedzią będzie nieskończoność!)

Są to wspaniałe wyniki, okupione heroicznym wysiłkiem ludzi i maszyn, ale potrzeba zdobycia się na nadludzki wysiłek stanowi jedną z największych wad „rozwiązywania" równań. Nie chcemy

zajmować cennych zasobów komputerowych i przez długi czas czekać na wyniki za każdym razem, gdy poszukujemy odpowiedzi na nieco tylko inne pytanie. Co ważniejsze, nie chcemy zajmować cennych zasobów komputerowych i czekać przez *bardzo* długi czas, gdy stawiamy bardziej skomplikowane pytanie. Chcielibyśmy na przykład móc przewidzieć masy nie tylko pojedynczych protonów i neutronów, lecz także układów zawierających kilka tych cząstek – jąder atomowych. W zasadzie mamy równania pozwalające tego dokonać, ale rozwiązanie ich jest nierealne. Podobnie mamy równania pozwalające odpowiedzieć na każde pytanie z zakresu chemii – *w zasadzie*. Nie pociągnęło to jednak za sobą masowych zwolnień wśród chemików czy zastąpienia ich komputerami, ponieważ w praktyce obliczenia te są zbyt trudne.

W fizyce jądrowej i chemii godzimy się na poświęcenie niezwykłej dokładności w imię łatwości użycia i elastyczności. Zamiast bezpośrednio „rozwiązywać" równania, przetwarzając mozolnie liczby, sporządzamy uproszczone modele i formułujemy zdroworozsądkowe reguły, dzięki którym możemy uzyskać praktyczne wskazówki w skomplikowanych sytuacjach. Te modele i reguły mogą być wynikiem doświadczenia zdobytego podczas rozwiązywania równań i można je sprawdzić, przeprowadzając obliczenia, gdy jest to wykonalne – najczęściej jednak żyją one własnym życiem. Przypomina mi to różnicę między studentami a profesorami: studenci wiedzą wszystko o niczym, profesorowie natomiast nic nie wiedzą o wszystkim. Rozwiązywanie równań to zajęcie dla studentów, zrozumienie ich to rola profesorów.

Gdy rozwiązując równania, odkrywamy jakieś całkowicie nieoczekiwane zachowanie, które wydaje się wręcz magiczne, jesteśmy wówczas jak najdalsi od zrozumienia. Komputery podały nam masę – nie dowolną masę, ale *naszą*, masę protonów i neutronów, z których się składamy – wywodząc ją z kwarków i gluonów, które same masy nie posiadają (albo jest ona nieznaczna). Równania QCD dają w wyniku „masę bez masy". Niemal jak coś z niczego – wygląda to podejrzanie. Jak to możliwe?

Na szczęście, możemy przedstawić przybliżone, „profesorskie" *wyjaśnienie* tego pozornego cudu. Musimy jedynie połączyć ze sobą

trzy idee, które już omówiliśmy oddzielnie. Przypomnijmy je sobie krótko, a potem dokonajmy ich syntezy.

## Idea pierwsza: niezwykłe burze

Ładunek koloru kwarków wywołuje w Siatce – a konkretnie w polu gluonowym – zaburzenie rosnące wraz z odległością. Przypomina to dziwną chmurę burzową, która w środku wygląda jak strzępiasty obłok, a w kierunku zewnętrznym przeradza się w złowrogie, ciężkie chmurzysko[71]. Zakłócenie pola wymaga wprowadzenia go w stan o większej energii. Gdybyśmy chcieli zakłócać pola w nieskończonej objętości, musielibyśmy ponieść nieskończony wydatek energetyczny. Nawet koncern BP nie ośmieliłby się stwierdzić, że przyroda dysponuje zasobami wystarczającymi na pokrycie takiego kosztu[72]. Dlatego swobodne kwarki nie mogą istnieć.

## Idea druga: kosztowne zrównoważenie

Ową rozległą, dziwną chmurę burzową można zniwelować, umieszczając w pobliżu kwarka jego antycząstkę z przeciwnym ładunkiem koloru. W takim wypadku obydwa źródła zaburzeń wzajemnie się znoszą i spokój zostaje przywrócony.

Gdyby antykwark znajdował się dokładnie na kwarku, zrównoważenie byłoby doskonałe. Dochodziłoby wtedy do najmniejszego możliwego zakłócenia pól gluonowych – a mianowicie, nie byłoby żadnego zaburzenia. Takie idealne zrównoważenie ma jednak swoją cenę. Wynika ona z kwantowomechanicznej natury kwarków i antykwarków.

Zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga, jeżeli chcemy znać dokładne położenie cząstki, musimy pogodzić się z tym, że wartość jej pędu będzie się zawierała w bardzo dużym przedziale. W szczególności musimy brać pod uwagę możliwość, że cząstka

ta będzie miała *duży* pęd, a to oznacza, że i dużą energię. Z im większą dokładnością ustalamy położenie cząstki, tym większy wiąże się z tym koszt energetyczny.

(Można też zrównoważyć ładunek koloru kwarka za pomocą dopełniających ładunków koloru dwóch innych kwarków. Takie zjawisko zachodzi właśnie w przypadku barionów, między innymi protonów i neutronów – w przeciwieństwie do mezonów, które tworzą pary kwark-antykwark. Zasada w obu przypadkach jest ta sama).

## Idea trzecia: drugie prawo Einsteina

Zachodzą więc dwa rywalizujące ze sobą efekty, które wywierają przeciwstawne wpływy. Aby dokładnie zniwelować zaburzenie pola i zminimalizować koszt energetyczny, Natura dąży do umieszczenia antykwarka w tym samym miejscu, w którym jest kwark. Chcąc jednak zminimalizować kwantowomechaniczny koszt dokładnego określenia położenia cząstki, pozwala antykwarkowi nieco się oddalić.

Natura idzie na kompromis. Utrzymuje równowagę między żądaniami pól gluonowych, które nie chcą być zaburzane, a wymaganiami kwarków i antykwarków, które chcą swobodnie się przemieszczać. (Można to porównać do zjazdu rodzinnego – polami gluonowymi byłyby wówczas rodzinne zrzędy, kwarkami i antykwarkami rozwrzeszczane dzieciaki, a rolę Natury odgrywałby któryś z odpowiedzialnych dorosłych).

Jak w przypadku każdego kompromisu efektem jest – no cóż, kompromis. Przyroda nie może spowodować, żeby obydwie energie miały jednocześnie wartość zero. Całkowita energia nie będzie więc zerowa.

W rzeczywistości różne układy mogą być mniej więcej stabilne. Każdy z nich będzie cechowała własna niezerowa energia $E$. Tym samym, zgodnie z drugim prawem Einsteina, każdy z tych układów będzie miał swoją masę $m = E/c^2$.

I takie jest właśnie pochodzenie masy. (A przynajmniej 95% masy zwykłej materii).

## Scholium

Taki moment kulminacyjny zasługuje na komentarz. Więcej nawet, jest to chwila odpowiednia na *scholium*, co po łacinie znaczy po prostu „komentarz”, ale brzmi dużo poważniej.

1. Nasze wyjaśnienie pochodzenia masy w żadnym miejscu nie odwołuje się do stwierdzenia, że kwarki i gluony mają jakąkolwiek masę, ani od takiego założenia nie zależy. Naprawdę uzyskaliśmy „masę bez masy”.

2. Bez mechaniki kwantowej wyjaśnienie to nie byłoby możliwe. Jeżeli nie uwzględnimy mechaniki kwantowej, *nie zrozumiemy*, skąd bierze się masa. Innymi słowy, bez mechaniki kwantowej bylibyśmy skazani na lekkość.

3. Podobny mechanizm, choć znacznie prostszy, działa również w atomach. Ujemnie naładowane elektrony odczuwają przyciąganie elektryczne jądra o ładunku dodatnim. Z tego punktu widzenia najchętniej by się do niego przytuliły. Jednak nie mogą tego zrobić, ponieważ są jednocześnie cząstkami i falami. W efekcie również tutaj zachodzi wiele możliwych kompromisów. To właśnie te kompromisy obserwujemy jako poziomy energetyczne atomu.

4. Tytuł jednego z artykułów Einsteina jest pytaniem i wyzwaniem:

> Czy bezwładność ciała zależy od zawartej w nim energii?

Jeśli ciałem tym jest ciało ludzkie, którego masa w przeważającym stopniu wynika z zawartych w nim protonów i neutronów, to odpowiedź jest jasna i jednoznaczna. Bezwładność tego ciała, z dokładnością do 95%, *jest* zawartą w nim energią.

71 W celu zminimalizowania energii zaburzenie tak naprawdę samoistnie przyjmuje kształt rurki, a wówczas energia jest proporcjonalna do jej długości (tak

samo jak masa, zgodnie z drugim prawem Einsteina). Rurka taka rozciąga się w ślad za wpływem ładunku koloru kwarka, a zatem nie może się nigdzie kończyć (chyba że na antykwarku) i jej koszt energetyczny jest nieskończony.

72 Może jest to z mojej strony pewna naiwność.

# Rozdział 11

# Muzyka Siatki: poemat w dwóch równaniach

*Masy cząstek są dźwiękiem, jaki wydaje z siebie drgająca przestrzeń, gdy gra. Muzyka Siatki bije na głowę dawny filar mistycyzmu – „muzykę sfer niebieskich" – jest bowiem zarówno bardziej fantastyczna, jak i – paradoksalnie – realistyczna.*

Połączmy drugie prawo Einsteina

$$m = E/c^2$$
(1)

z innym fundamentalnym równaniem, wzorem Plancka–Einsteina–Schrödingera

$$E = hv$$
(2)

Wzór ten wiąże energię $E$ stanu kwantowomechanicznego z częstotliwością $v$, z jaką drga jego funkcja falowa. Symbol $h$ oznacza stałą Plancka. Planck umieścił ją w swojej rewolucyjnej hipotezie (z 1899 roku), która doprowadziła do powstania teorii kwantowej: stwierdził, że atomy mogą emitować i absorbować światło o częstotliwości $v$ jedynie w pakietach o energii $E = hv$.

W swojej hipotezie fotonu (rok 1905) Einstein posunął się o krok dalej: powiedział, że światło o częstotliwości $v$ zawsze występuje w pakietach o $E = hv$. W końcu Schrödinger wykorzystał ten związek w swoim podstawowym wzorze na funkcje falowe – w równaniu Schrödingera (z roku 1926). W ten sposób narodziła się współczesna, powszechnie stosowana interpretacja: funkcja falowa dowolnego stanu o energii $E$ drga z częstotliwością $v$ określoną wzorem: $v = E/h$[73].

Dzięki połączeniu myśli Einsteina i Schrödingera otrzymujemy wspaniałą poezję:

$$(*)\ v = mc^2/h\ (*)$$

Starożytni filozofowie wprowadzili pojęcie „muzyki sfer niebieskich", które zainspirowało wielu uczonych (w tym Johannesa Keplera) i jeszcze liczniejsze grono mistyków. Ponieważ ruch okresowy (drgania) instrumentów muzycznych wytwarza długo brzmiące dźwięki, idea ta głosi, że okresowym ruchom planet krążących po orbitach musi towarzyszyć jakaś muzyka. Choć porównanie to jest niezwykle obrazowe i dźwięczne, tak inspirujące przewidywanie efektów multimedialnych nigdy nie przekształciło się jednak w bardziej dokładną czy owocną ideę naukową. Nigdy nie wykroczyło poza ramy niejasnej metafory, dlatego pozostaje otoczone cudzysłowami: „muzyka sfer niebieskich".

Nasze równanie (*) jest bardziej fantastycznym, a jednocześnie bardziej realistycznym ucieleśnieniem tej samej idei. Zamiast szarpać strunę, dąć w piszczałkę, uderzać w bęben czy bić w gong, gramy na instrumencie, którym jest pusta przestrzeń, zestawiając różne kombinacje kwarków, gluonów, elektronów, fotonów… (czyli bitów reprezentujących te byty) i pozwalając, by się ustabilizowały i osiągnęły równowagę ze spontaniczną aktywnością Siatki. Ani planety, ani żadne materialne konstrukcje nie pomniejszają najwyższej doskonałości naszego instrumentu. Wybiera on jeden z możliwych trybów drgań o różnych częstotliwościach $v$, w zależności od tego, jak na nim brzdąkamy i za pomocą czego.

Drgania te są cząstkami o różnych masach *m*, zgodnie ze wzorem (*). Masy cząstek rozbrzmiewają Muzyką Siatki.

73 Uważni czytelnicy rozpoznają w tym wzorze drugie prawo Schrödingera.

# Rozdział 12

# **Głęboka** prostota

*Nasze najlepsze teorie na temat świata fizycznego zdają się skomplikowane i trudne, ponieważ są głęboko proste.*

Często cytuje się radę Einsteina: „Wszystko powinno być tak proste, jak to tylko możliwe, ale nie prostsze”. Po przestudiowaniu jego ogólnej teorii względności albo teorii fluktuacji w mechanice statystycznej – dwóch najbardziej intrygujących osiągnięć Einsteina – można się zastanawiać, czy on sam stosował się do swojej rady. Z pewnością teorie te nie są „proste” w normalnym znaczeniu tego słowa.

Współcześni fizycy uważają, że chromodynamika kwantowa jest niemal wzorcowo prostą teorią, a przecież przekonaliśmy się, jak trudno jest opisać QCD z użyciem zwyczajnych słów i jak wiele wysiłku wymaga praca z tą teorią (*nie* rozwiązywanie jej równań). Podobnie jak głęboka prawda Bohra, głęboka prostota zawiera w sobie element przeciwny – głęboką złożoność. To paradoks, ale jego rozwiązanie okazuje się głęboko oczywiste, o czym się zaraz przekonamy.

## Doskonałość w złożoności: Salieri, Józef II i Mozart

Znaczenie słowa „doskonałość” poznałem dzięki znanemu przeciętnemu kompozytorowi Antonio Salieriemu[74]. W jednej ze scen

filmu *Amadeusz* – jednego z moich ulubionych – Salieri, spoglądając otwartymi ze zdziwienia oczami na rękopis utworu Mozarta, mówi[75]: „Usunięcie jednej nuty stanowiłoby ujmę. Przesunięcie jednej frazy zburzyłoby całą strukturę".

Tymi słowami Salieri uchwycił istotę doskonałości. Te dwa zdania precyzyjnie definiują, co rozumiemy przez pojęcie doskonałości w wielu dziedzinach, włącznie z fizyką teoretyczną. Można by powiedzieć, że jest to doskonała definicja.

Teoria zaczyna być doskonała, gdy jakakolwiek jej modyfikacja oznacza zmianę na gorsze. Tak brzmi pierwsze zdanie Salieriego przetłumaczone z języka muzyki na język fizyki. Trafia w sedno. Jednak naprawdę genialne jest drugie wypowiedziane przez niego zdanie. Teoria staje się doskonale doskonała, jeżeli nie można dokonać w niej znaczących zmian bez całkowitego jej zniszczenia – innymi słowy, jeżeli każda istotna modyfikacja zmienia ją w nonsens.

W tym samym filmie cesarz Józef II udziela Mozartowi muzycznej rady: „Twój utwór jest pomysłowy. Bardzo udany. Ma tylko za dużo nut. Wykreśl kilka i będzie doskonały"[76]. Cesarza zbiła z tropu pozorna złożoność muzyki Mozarta. Nie zauważył, że każda nuta czemuś służy – składa obietnicę lub ją spełnia, dopełnia jakiś wzór lub wprowadza wariację.

Podobnie przy pierwszym kontakcie ludzie czują się często zbici z pantałyku przez pozorną złożoność fizyki cząstek elementarnych. Za dużo gluonów!

Jednak każdy z ośmiu gluonów spełnia jakiś cel. Razem dopełniają symetrię ładunków koloru. Wystarczy usunąć jeden gluon lub zmienić jego własności, a cała konstrukcja się zawali. Mówiąc konkretnie, jeżeli dokona się takiej zmiany, to teoria znana wcześniej jako QCD zaczyna przewidywać bzdury; prawdopodobieństwa towarzyszące niektórym cząstkom stają się ujemne, a w przypadku innych – większe od 1. Tak doskonale sztywna teoria, czyli taka, która nie pozwala na bezkarne modyfikacje, z jednej strony jest niezwykle wrażliwa. Jeżeli którekolwiek z jej przewidywań okaże się nieprawdziwe, nie ma żadnej drogi ucieczki. Nie ma żadnych parametrów swobodnych czy możliwości dostrojenia czegokolwiek.

Z drugiej strony taka teoria, gdy już odniesie istotny sukces, staje się naprawdę potężna. Skoro bowiem wiemy, że jest mniej więcej poprawna, a do tego nie można jej zmienić, to znaczy, iż musi być całkowicie poprawna!

Kryteria Salieriego wyjaśniają, dlaczego symetria jest tak atrakcyjną zasadą podczas konstruowania teorii. Układy posiadające symetrię są w połowie drogi do osiągnięcia doskonałości w rozumieniu Salieriego. Równania rządzące różnymi obiektami i sytuacjami muszą być ze sobą ściśle powiązane, inaczej bowiem symetria doznałaby ujmy. Przy większej liczbie naruszeń uporządkowanie znika i symetria się rozpada. Symetria pomaga nam w konstruowaniu doskonałych teorii.

Sednem sprawy nie jest zatem liczba nut, cząstek czy równań. Jest nią doskonalenie wzorów i motywów, których są ucieleśnieniem. Jeżeli usunięcie któregokolwiek z tych elementów zniszczyłoby taki wzór, to ich liczba jest akurat taka, jak być powinna. Mozart świetnie odpowiedział cesarzowi: „Które dokładnie ma pan na myśli?”.

## Głęboka prostota: Sherlock Holmes, jeszcze raz Newton i młody Maxwell

Pewnym sposobem uniknięcia doskonałości jest dodanie niepotrzebnych komplikacji. Jeżeli napotkamy takie komplikacje, możemy je wykreślić bez ujmy i usunąć bez burzenia całej struktury. Poza tym takie niepotrzebne gmatwanie odwraca również naszą uwagę, jak w tej historii o genialnym detektywie Sherlocku Holmesie i jego przyjacielu doktorze Watsonie:

> Sherlock Holmes i doktor Watson wybrali się na wycieczkę. Gdy niebo rozświetliły gwiazdy, rozbili namiot i poszli spać. W środku nocy Holmes budzi Watsona i pyta:
> – Watsonie, spójrz na gwiazdy! O czym one nam mówią?

– Uczą nas pokory. Muszą ich być miliony i nawet jeżeli tylko niewielki ich ułamek ma planety takie jak Ziemia, to i tak na setkach z nich żyją zapewne istoty inteligentne. Niewykluczone, że niektóre z nich są mądrzejsze od nas. Być może spoglądają przez olbrzymie teleskopy na Ziemię i widzą ją taką, jaka była wiele tysięcy lat temu. Może zastanawiają się, czy kiedykolwiek na tej planecie pojawi się inteligentna forma życia.
– Watsonie, tak naprawdę – odpowiada po chwili Holmes – gwiazdy mówią o tym, że ukradli nam namiot[77].

Przechodząc od żartu do rzeczy wzniosłych, przypomnijmy sobie, że sir Izaak Newton nie był zadowolony ze swojej teorii grawitacji, w której występowały siły działające na odległość przez pustą przestrzeń. Ponieważ jednak teoria ta zgadzała się ze wszystkimi ówczesnymi obserwacjami, a sam nie mógł odkryć żadnego konkretnego sposobu jej poprawienia, Newton odłożył na bok swoje filozoficzne zastrzeżenia i przedstawił ją taką, jaka była. W *scholium* zamykającym *Principia* zamieścił taką deklarację[78]:

Nie udało mi się odkryć na podstawie obserwowanych zjawisk przyczyny owych własności grawitacji i nie wysuwam żadnych hipotez; wszystko bowiem, co nie jest wywiedzione z obserwacji zjawisk, musi być zwane hipotezą, ta zaś, metafizyczna czy fizyczna, o właściwościach okultystycznych czy mechanicznych, nie może stać się częścią filozofii doświadczalnej.

Kluczowym zwrotem jest tutaj stwierdzenie: „nie wysuwam żadnych hipotez” – w oryginale napisanym po łacinie brzmi on: *hypothesis non fingo*. I takie właśnie łacińskie motto umieścił Ernst Mach pod portretem Newtona w swoim wpływowym dziele *Mechanika*. Jest tak znane, że poświęcono mu nawet oddzielny artykuł w Wikipedii. Oznacza ono po prostu, że Newton nie chciał wypełniać swojej teorii grawitacji spekulacjami, na których poparcie

nie było żadnych dowodów obserwacyjnych. (W prywatnych notatkach Newton jednak zawzięcie próbował odkryć dowód istnienia jakiegoś medium wypełniającego przestrzeń).

Najprostszym oczywiście sposobem na uniknięcie niepotrzebnych komplikacji jest nie odzywać się w ogóle. By uniknąć tej pułapki, musimy wzorować się na młodym Maxwellu. Według jednego z jego pierwszych biografów[79] jako mały chłopiec ciągle pytał „ze szkockim akcentem i składnią zdania":

– A jak to działa?

Jeśli nie uzyskał satysfakcjonującej go odpowiedzi, pytał dalej:

– Ale jak to *tak dokładnie* działa?

Innymi słowy, musimy być ambitni. Musimy bezustannie zadawać wciąż nowe pytania i starać się uzyskać dokładne, ilościowe odpowiedzi. Określenie *rewolucja naukowa* zostało już użyte do nazwania tylu różnych fenomenów, że uległo dewaluacji. Najważniejszą, nigdy niewyczerpującą się Rewolucją Naukową było pojawienie się ambicji popychającej nas do tworzenia dokładnych matematycznych modeli świata i wiary, że to się może udać.

Między sprzecznymi potrzebami – dążeniem do oszczędności w założeniach a uzyskaniem *dokładnej* odpowiedzi na wiele pytań istnieje twórcze napięcie. *Głęboka* prostota jest skąpa, jeśli chodzi o dane wejściowe, lecz niezwykle hojna w kwestii wyników.

## Kompresja, dekompresja i (nie)wykrywalność

W komunikacji i informatyce jednym z najważniejszych problemów jest kompresja danych. Myślę, że pozwala nam ona spojrzeć z nowej i ważnej perspektywy na kwestię znaczenia i istotnej roli, jaką prostota odgrywa w nauce.

Podczas przesyłania informacji chcemy możliwie najpełniej wykorzystać dostępną szerokość pasma. Dlatego odchudzamy wiadomość, usuwamy z niej nadmiarowe czy nieistotne informacje[80]. Użytkownicy iPodów i aparatów cyfrowych z pewnością znają skróty

takie jak MP3 lub JPEG. MP3 to standard kompresji dźwięku, a JPEG jest standardem kompresji obrazu. Oczywiście na drugim końcu odbiorca musi po odebraniu takiej odchudzonej wiadomości rozpakować ją i odtworzyć jej początkowy wygląd. Podobne problemy pojawiają się w przypadku przechowywania informacji. Chcemy, by dane zajmowały jak najmniej miejsca, ale jednocześnie aby łatwo można je było odczytać we właściwej im postaci.

Patrząc z szerszej perspektywy, można zauważyć, że wiele wyzwań, którym ludzie muszą stawić czoło, usiłując zrozumieć świat, sprowadza się do problemów kompresji danych. Nasze zmysły są wprost zalewane informacjami o świecie zewnętrznym. Musimy je zmieścić w dostępnej szerokości pasma naszego mózgu. W życiu doświadczamy tak wiele, że nie możemy przechowywać szczegółowych wspomnień na temat wszystkiego; tak zwana pamięć fotograficzna jest zjawiskiem rzadkim i co najmniej ograniczonym. Tworzymy więc robocze modele i reguły zdroworozsądkowe, które pozwalają nam posługiwać się fragmentarycznymi odzwierciedleniami świata, wystarczającymi do tego, by w nim poprawnie funkcjonować. Okrzyk „Uwaga, zbliża się tygrys!” jest komunikatem, w którym upakowano całe gigabajty informacji optycznej, megabajty danych audio zawierających ryk tygrysa, a może nawet – a to już oznacza problemy – kilka kilobajtów jego zapachu i wywołanego przez niego podmuchu wiatru. (Informacja dla znawców tematu: w kodzie ASCII wiadomość ta ma dokładnie 25 bajtów). Wiele informacji pominięto, ale z tego, co zostało, możemy odczytać kilka bardzo ważnych faktów.

Konstruowanie *głęboko* prostych teorii fizyki jest olimpijską rywalizacją[81] w dziedzinie kompresji danych. Celem jest znalezienie możliwie najkrótszej wiadomości – najlepiej w postaci jednego równania – która po rozpakowaniu dałaby szczegółowy, dokładny model świata fizycznego. Jak we wszystkich konkurencjach olimpijskich, również w tym przypadku obowiązują pewne zasady. Dwie najważniejsze z nich to:

- Brak klarowności powoduje obniżenie oceny za styl.

• Dyskwalifikuje się teorie podające błędne przewidywania.

Gdy się już zrozumie zasady tej gry, niektóre z jej dziwnych cech stają się mniej tajemnicze. W szczególności: ponieważ dążymy do uzyskania jak największej kompresji danych, musimy się liczyć z tym, że będziemy mieli do czynienia ze zmyślnymi i trudnymi do odcyfrowania kodami. Na przykład weźmy „Prosty przykład zdania w języku polskim". Możemy je skrócić, usuwając samogłoski:

Prst przkład zdn w jzk plskm.

Trudniej je teraz odczytać, ale nie ma większej niejasności, co zdanie to oznacza. Zgodnie z regułami gry uczyniliśmy krok w dobrym kierunku. Pójdźmy więc dalej i usuńmy odstępy:

Prstprzkładzdnwjzkplskm.

Teraz informacja taka może już budzić nasze wątpliwości. Można by ją błędnie odczytać jako:

Piór sto przy kłodzie da nowej oazie i kąpielisku imię.

Oczywiście język polski jest tak specyficzny, że taka metoda kodowania, z powodu niejednoznaczności, traci dużo na nocie za styl. Trudno mieć stuprocentową pewność, co należy uważać za poprawne zdanie. W konkurencji dotyczącej głębokiej prostoty dekodowanie musi być przeprowadzone zgodnie z precyzyjnie zdefiniowanymi procedurami matematycznymi. Jednak już ten prosty przykład pokazuje, że krótkie zakodowane informacje będą mniej zrozumiałe niż oryginalne wiadomości i odczytanie ich będzie wymagało dużo sprytu i wysiłku.

W wyniku prac trwających całe stulecia najkrótsze z zakodowanych wiadomości mogą stać się całkiem zagmatwane. W takiej sytuacji posługiwanie się nimi będzie możliwe dopiero po wielu latach nauki,

a odczytanie każdej konkretnej wiadomości będzie kosztowało wiele wysiłku. Teraz już zapewne rozumiecie, dlaczego współczesna fizyka wygląda tak a nie inaczej!

Tak naprawdę mogłaby wyglądać dużo gorzej. Wiemy, że ogólny problem znalezienia najlepszego sposobu kompresji dowolnego zbioru danych jest nierozwiązywalny. Powodem tego jest fakt blisko związany ze słynnym twierdzeniem o niezupełności Gödla oraz (szczególnie) z przedstawionym przez Turinga wywodem pokazującym, iż nie można jednoznacznie rozstrzygnąć, czy dany program komputerowy kiedykolwiek się zakończy. Poszukując najlepszej metody kompresji danych[82], wpadamy zatem wprost na grząski grunt problemu Turinga: nie możemy mieć pewności, czy nasza najnowsza, wspaniała sztuczka umożliwiająca jeszcze większe upakowanie informacji nie spowoduje, że dekoder wpadnie w nigdy niekończącą się pętlę.

Wydaje się jednak, że Natura operuje danymi, które w żadnym wypadku nie są arbitralne. Zdołaliśmy sporządzić krótkie zakodowane wiadomości opisujące w pełni i dokładnie olbrzymie fragmenty rzeczywistości. Więcej nawet: gdy w przeszłości udawało nam się tę zakodowaną informację skrócić jeszcze bardziej i uczynić ją bardziej abstrakcyjną, przekonywaliśmy się, że po jej rozwinięciu otrzymujemy rozszerzone dane odpowiadające nowym aspektom rzeczywistości.

Gdy Newton zakodował trzy prawa ruchu planet Keplera w swoim prawie powszechnej grawitacji, wysypały się z niego wyjaśnienia pływów morskich, precesji równonocy i wielu innych odchyleń i chybotań. W roku 1846, po blisko dwustu latach bezustannych triumfów newtonowskiej grawitacji, w orbicie Urana wykryto niewielkie odchylenia. Urbain Le Verrier doszedł do wniosku, że można je wyjaśnić, jeżeli przyjmie się istnienie nowej planety[83]. I proszę – gdy obserwatorzy skierowali teleskopy tam, gdzie radził im szukać, ich oczom ukazał się Neptun! (Jak się przekonamy, dzisiejszy problem ciemnej materii jest osobliwym echem tego odkrycia).

Coraz bardziej skompresowane, *głęboko* proste równania na wejściu, coraz bardziej złożone obliczenia pozwalające je odczytać i coraz bogatsze wyniki pasujące, jak się okazuje, do rzeczywistości. Tak, jak sądzę, brzmi praktyczna interpretacja tego, co Einstein miał na myśli, mówiąc: „Pan Bóg jest wyrafinowany, lecz nie perfidny". Mamy nadzieję, że szczęście będzie nam dalej dopisywało w wysiłkach prowadzących do jeszcze większej unifikacji.

74 Znawcy muzyki poważnej kwestionują tezę o przeciętności Salieriego. Nie zmienia to faktu, jest on znany z przeciętności.

75 Tak naprawdę to oczywiście scenarzysta wkłada te kwestie w usta bohaterów!

76 Cytaty z filmu Amadeusz przytaczamy za polską edycją DVD (przyp. tłum.).

77 Pomysł na ten dowcip zaczerpnąłem z książki *Dziwnologia* Richarda Wisemana.

78 Uwaga: możliwe, że doświadczycie déjà vu. Przytaczałem już ten fragment w rozdziale ósmym.

79 W internecie pod adresem http://www.sonnetsoftware.com/bio/maxbio.pdf dostępna jest książka *The Life of James Clerk Maxwell, with a selection from his correspondence and occasional writings and sketch of his contributions to science* Lewisa Campbella i Williama Garnetta. Jest to wspaniałe źródło informacji na temat wszystkiego, co wiąże się z Maxwellem. Oprócz dobrej, staroświeckiej biografii zawiera również doskonały opis jego nauki i bogaty wybór rysunków i listów – a nawet kilka napisanych przez uczonego sonetów.

80 Projektując dobrą metodę kompresji danych, należy wziąć pod uwagę jeszcze kilka innych czynników, oprócz najbardziej oczywistego dążenia do maksymalnego skrócenia wiadomości. Można pogodzić się z występowaniem pewnych rodzajów błędów, pod warunkiem że nie wyrządzą one zbyt dużych szkód. Format JPEG polega na przykład na podzieleniu ciągłego obrazu na pojedyncze piksele i zrezygnowaniu z wierności w zapisie koloru, ale zwykle daje dobrze wyglądające „reprodukcje". Jeśli zaś zależy nam niezwykle na dokładności przesyłanej wiadomości, a musimy ją przekazać zaszumionym kanałem, możemy wprowadzić dodatkową informację, nawet kosztem wydłużenia przekazu. W ten sposób koduje

się komunikaty z pomiarami wykonanymi przez satelity astronomiczne i GPS. Podobnie projektantom inżynieryjnych lub ekonomicznych modeli matematycznych mogłoby na przykład zależeć na tym, by równania z pewną pobłażliwością traktowały błędy wynikające z niedostatecznej precyzji wykonania elementów lub pozyskiwania danych i pozwalały na wprowadzenie jak największej ilości rzeczywistych danych wejściowych. Fizyka teoretyczna kładzie jednak ogromny nacisk na kompresję i dokładność.

81 Oczywiście nie jest to dyscyplina olimpijska, nie obejrzymy więc takich zmagań na olimpiadzie. Używam określenia rywalizacja olimpijska w tym sensie, że jest to wyzwanie godne greckich bogów i bogiń.

82 Jeśli interesują was pojęciowe podstawy współczesnej kompresji danych, polecam książkę *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms* Davida MacKaya. Natomiast o związkach kompresji z procesem tworzenia teorii i pracami Gödla oraz Turinga można się dowiedzieć z książki Minga Li i Paula Vitányiego *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*.

83 Historia odkrycia Neptuna jest skomplikowana i, jak rozumiem, nieco kontrowersyjna. Już w 1821 roku Alexis Bouvard sugerował, że jakaś „ciemna materia" może powodować perturbacje w ruchu Urana. Jednak bez teorii matematycznej nie potrafił powiedzieć, gdzie należy jej szukać. W 1843 roku John Couch Adams przeprowadził odpowiednie obliczenia, z których wynikało, że wyjaśnieniem problemów z orbitą Urana mogłaby być nowa planeta, i nawet wyznaczył odpowiednie współrzędne, ale nigdy swojej pracy nie opublikował ani nie nakłonił żadnego obserwatora do poszukania jej we wskazanym miejscu.

# Część II

# Słabość grawitacji

W astronomii najważniejszą siłą jest grawitacja. Na poziomie podstawowym jednak siły grawitacyjne działające między cząstkami elementarnymi są śmiesznie małe w porównaniu z oddziaływaniem elektrycznym czy silnym. Ta dysproporcja stanowi duże wyzwanie dla ideału unifikacji teorii, którego celem jest sprowadzenie wszystkich sił do wspólnego mianownika. Nasze nowe rozumienie pochodzenia masy sugeruje pewną odpowiedź.

# Rozdział 13

# Czy grawitacja jest słaba? W praktyce: tak

*Gdy porówna się ją z innymi podstawowymi siłami, biorąc pod uwagę oddziaływanie między cząstkami elementarnymi, grawitacja okazuje się* śmiesznie *słaba.*

Jeśli właśnie przed chwilą wygramoliliście się z trudem z łóżka lub z uczuciem ulgi po ciężkim dniu opadliście z impetem na fotel z dobrą książką w ręce, zapewne trudno będzie wam uwierzyć, że grawitacja jest słaba. O dziwo, na poziomie podstawowym taka właśnie jest. Śmiesznie słaba.

Oto kilka porównań.

Atomy utrzymują się w całości dzięki siłom elektrycznym. Dodatnio naładowane jądro atomowe przyciąga elektrycznie obdarzone ujemnym ładunkiem elektrony. Wyobraźmy sobie, co by się stało, gdybyśmy potrafili wyłączyć siły elektryczne. Pozostałoby jeszcze przyciąganie grawitacyjne. Jak silnie grawitacja mogłaby łączyć jądra atomowe i elektrony? Jak duży byłby atom utrzymujący się w całości dzięki grawitacji? Tak duży jak pchła? Nie. Mysz? Nie. Drapacz chmur? Nie, zgadujcie dalej. Ziemia? Nie jesteście nawet blisko. Atom utrzymujący się w całości dzięki grawitacji miałby *promień sto razy większy od promienia obserwowalnego Wszechświata*.

Znanym efektem grawitacyjnym jest zakrzywienie światła przez Słońce. Gdy w 1919 roku zjawisko takie zaobserwowała brytyjska wyprawa, oznaczało to triumf ogólnej teorii względności, dzięki któremu Einstein zyskał światową sławę. Całe ogromne Słońce, działając na przemieszczający się w pobliżu foton, odchyliło jego tor o 1,75 sekundy łuku – około 0,05% jednego stopnia. Porównajmy to z tym, jak oddziaływanie silne wpływa na gluony. Kilka kwarków tak silnie odchyla prosty tor ruchu gluonu, że w obrębie promienia protonu gluon dokonuje pełnego zwrotu i pozostaje w jego środku.

Możemy również porównać siły liczbowo. Ponieważ zarówno siła elektryczna, jak i grawitacyjna słabną tak samo wraz z odległością (mianowicie, proporcjonalnie do odwrotności jej kwadratu)[84], dla każdej odległości otrzymamy taki sam stosunek. Porównajmy oddziaływania elektryczne i grawitacyjne między protonem a elektronem. Oddziaływanie elektryczne jest około 10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 razy silniejsze. Używając notacji wykładniczej, liczbę tę zapiszemy jako $10^{40}$. (Rozumiecie już, dlaczego uczeni wolą używać liczb w postaci wykładniczej).

– Oszustwo! – zarzucą mi krytycy. – Protony są złożonymi obiektami. Powinieneś porównywać działanie sił między podstawowymi, elementarnymi obiektami.

Dobrze, jak sobie chcecie – to tylko pogorszy sprawę! Jeżeli porównamy siły działające między elektronami, uzyskamy jeszcze większą liczbę – około $10^{43}$ – ponieważ masa elektronu jest mniejsza od protonu przy takiej samej wielkości ładunku.

Gdy wstajemy z łóżka, pokonujemy przyciąganie grawitacyjne całej Ziemi, wykorzystując do tego niewielką część energii chemicznej, której źródłem jest zjedzona ubiegłego wieczoru kolacja. Każdy, kto próbował spalić kalorie, walcząc z grawitacją (podnosząc ciężary czy uprawiając gimnastykę), potwierdzi, że nie stawia ona zbyt dużego oporu – trzeba dosyć długo ćwiczyć, by zrzucić choć parę kilogramów.

Kolejna miara słabości grawitacji: promieniowanie elektromagnetyczne jest siłą napędową współczesnej astronomii –

od anten radiowych przez teleskopy optyczne po satelity obserwujące w zakresie promieniowania rentgenowskiego. Jest ono również podstawą współczesnych technik komunikacyjnych – od zwykłego radia przez anteny satelitarne (mikrofalowe) po włókna optyczne. Promieniowania grawitacyjnego natomiast nie udało się jeszcze wykryć mimo usilnych starań[85].

Grawitacja jest siłą, która dominuje w astronomii, ale jedynie z braku lepszej alternatywy. Pozostałe oddziaływania są dużo silniejsze, jednak nie tylko przyciągają, lecz także odpychają. W normalnych warunkach materia osiąga dokładny stan równowagi, w którym wpływ oddziaływań wzajemnie się znosi. Chwilowe zachwianie tej równowagi (*niewielkie*) w przypadku sił elektrycznych prowadzi do burz z piorunami; małe chwilowe zaburzenie równowagi oddziaływań silnych prowadzi do wybuchów jądrowych. Większość załamań równowagi nie może być trwała. Grawitacja jednak wyłącznie przyciąga. Chociaż jest słaba na poziomie pojedynczych cząstek elementarnych, siły grawitacyjne nieubłaganie się ze sobą sumują. Cisi posiądą kosmos.

84 Stwierdzenie to jest prawdziwe dla odległości makroskopowych. Na ultrakrótkich odległościach do głosu dochodzą nowe efekty i prawa sił są inne. Mówiliśmy już o tym, że fluktuacje Siatki mogą wpłynąć na oddziaływanie, gdy wirtualne cząstki zmniejszają (ekranują) lub zwiększają (antyekranują) jego siłę. Wspomnieliśmy też, że w mechanice kwantowej badanie małych odległości wiąże się zawsze z dużym pędem i energią. Wpływa to na grawitację, ponieważ siła ta zmienia się proporcjonalnie do energii. Wszystkie te modyfikacje sił odgrywają bardzo ważną rolę w przypadku idei związanych z unifikacją, o których będziemy mówili w części III.

85 Chociaż samego promieniowania grawitacyjnego nie udało się wykryć, zaobserwowano jedną z konsekwencji, które powinny wynikać z jego istnienia. Przeprowadzone w długim okresie dokładne badania układu podwójnego z pulsarem PSR 1913+16 wskazują, że jego orbita zmieniała się w sposób zgodny z teoretycznie obliczonym efektem utraty energii spowodowanym promieniowaniem grawitacyjnym. W 1993 roku Russell Hulse i Joseph Taylor zdobyli za te prace Nagrodę Nobla.

# Rozdział 14

# Czy grawitacja jest słaba? W teorii: nie

*Grawitacja jest siłą powszechną. Kształtuje podstawową strukturę przestrzeni i czasu. Jest podstawowa. Powinniśmy więc wykorzystywać ją do mierzenia innych zjawisk, zamiast wykorzystywać inne zjawiska do mierzenia grawitacji. Grawitacja nie może zatem być słaba w sensie absolutnym – ona po prostu jest, jaka jest. To, że grawitacja zdaje się słaba, oznacza dla teorii kłopotliwy fakt. Jest to również dużą przeszkodą na drodze do unifikacji.*

Einsteinowska teoria grawitacji – ogólna teoria względności – wiąże istnienie oddziaływania grawitacyjnego ze strukturą przestrzeni i czasu. Zgodnie z tą teorią efekt, który postrzegamy jako działanie siły grawitacyjnej, jest po prostu wynikiem tego, że ciała próbują najlepiej jak mogą przemieszczać się po linii prostej w pokrzywionym krajobrazie czasoprzestrzeni. Same ciała są również źródłem tego zakrzywienia. Zakrzywienie spowodowane przez ciało B wpływa na ruch ciała A, powodując powstanie zjawiska, które w języku newtonowskim nazwalibyśmy „siłą grawitacji” [86].

Dalekosiężną konsekwencją zaproponowanego przez Einsteina obrazu grawitacji jest *powszechność* tej siły. Każde ciało, które stara się przemieszczać w zakrzywionej czasoprzestrzeni po linii prostej, będzie podążało tą samą drogą[87]. O kształcie najlepszej trajektorii

decyduje zakrzywienie czasoprzestrzeni, a nie jakaś szczególna własność danego ciała.

Tak naprawdę to właśnie dająca się zauważyć powszechność grawitacji w dużym stopniu naprowadziła Einsteina na jego teorię. W newtonowskim opisie grawitacji owa powszechność była niewyjaśnionym zbiegiem okoliczności (a raczej nieskończoną liczbą zbiegów okoliczności – po jednym dla każdego ciała). Z jednej strony siła grawitacyjna odczuwana przez ciało jest proporcjonalna do jego masy. Z drugiej – przyspieszenie, jakie ciało odczuwa w odpowiedzi na działanie danej siły, jest *odwrotnie* proporcjonalne do masy. (O tym mówi drugie prawo drugiej zasady dynamiki Newtona. W oryginalnym zapisie druga zasada dynamiki wygląda następująco: $F = ma$; a zatem drugie prawo tej zasady brzmi: $a = F/m$). Po złożeniu tych dwóch stron odkryjemy, że grawitacyjne przyspieszenie ciała – faktyczne zaburzenie jego ruchu – zupełnie nie zależy od jego masy!

I takie zjawisko obserwujemy: ruch niezależny od masy. Zachowanie to jest *powszechne*: wszystkie ciała przyspieszają pod wpływem grawitacji tak samo. Jednak opis newtonowski nie tłumaczy, dlaczego tak się dzieje. Siła grawitacyjna działająca na ciało nie musiała być proporcjonalna do jego masy. Znamy przecież siły, na przykład siłę elektryczną, które nie zależą od masy.

Teoria Einsteina wyjaśnia ten grawitacyjny „zbieg okoliczności". A raczej wykracza poza niego: nie musimy mówić oddzielnie o sile i reakcji na działanie siły, które przypadkiem zależą od masy w odwrotny sposób. Mówimy jedynie o ciałach, które starają się jak mogą, by poruszać się prosto w zakrzywionej czasoprzestrzeni. Tak wygląda głęboka prostota w najlepszym wydaniu.

## Powszechność a unifikacja

Gdy próbujemy znaleźć zunifikowaną teorię obejmującą wszystkie siły przyrody, połączenie powszechności grawitacji z jej (pozorną) słabością stanowi nie lada problem. Oto jakie mamy możliwości:

• Grawitację można by wyprowadzić z innych podstawowych sił. Ponieważ efekt jej działania jest tak mały (słaby), może grawitacja jest produktem ubocznym, niewielką pozostałością po prawie doskonałym zrównoważeniu się wpływu przeciwnych ładunków elektrycznych lub koloru, a może czegoś jeszcze bardziej egzotycznego? Jeżeli tak, to dlaczego siła taka miałaby być powszechna? Pozostałe siły z całą pewnością *nie mają* powszechnego charakteru: oddziaływanie silne odczuwają kwarki, ale nie elektrony; siła elektromagnetyczna wpływa na elektrony i kwarki, ale nie na fotony czy gluony. Trudno sobie wyobrazić, żeby prosta powszechna siła, działająca tak samo na wszystkie cząstki, mogła powstać z tak asymetrycznych składników.

• Pozostałe siły można by wyprowadzić z grawitacji. Łatwo sobie wyobrazić, jak siła niedziałająca tak samo na wszystkie cząstki mogłaby powstać z siły powszechnej. Takie powszechne równania mogłyby mieć kilka *różnych* rozwiązań, w których energia byłaby skoncentrowana w małych obszarach przestrzeni; rozwiązania te interpretowalibyśmy jako cząstki o różnych własnościach. (Wydaje się, że sam Einstein miał nadzieję, iż uda mu się skonstruować teorię materii zgodną z tym rozumowaniem). Trudno jednak sobie wyobrazić, jak niezwykle słaba siła mogłaby przekształcić się w siłę znacznie mocniejszą.

• Wszystkie siły mogłyby być traktowane tak samo, jako różne aspekty – być może powiązane ze sobą symetrią – jakiejś jednej całości, niczym różne ścianki kostki do gry. Trudno jednak pogodzić taką ideę z faktem, że grawitacja jest dużo słabsza od pozostałych sił.

Wyraźmy to innymi słowy: wiara w możliwość unifikacji powoduje, że osiągamy stan, który w psychologii określa się terminem zaprzeczenie. Nie możemy pogodzić się z tym, że grawitacja naprawdę jest słaba, mimo iż tak to wygląda. Pozory – a raczej to, jak je interpretujemy – muszą mylić.

86 Dokładniej rzecz biorąc, teoria Newtona opisuje efekty ogólnej teorii względności w przybliżeniu. Teoria newtonowska sprawdza się najlepiej, gdy ciała

poruszają się powoli w porównaniu z prędkością światła, nie są zbyt duże ani gęste.

87 Tak samo jak przez dany punkt może przechodzić nieskończenie wiele prostych, tak nieskończenie wiele „najprostszych” trajektorii o różnych nachyleniach może przebiegać przez dany punkt czasoprzestrzeni. Odpowiadają one torom ruchu cząstek o różnych prędkościach początkowych. Precyzyjnie zatem powszechność należy sformułować następująco: ciała wyruszające z tego samego miejsca i *z taką samą prędkością* pod wpływem grawitacji będą się poruszały w taki sam sposób.

# Rozdział 15

# Właściwe pytanie

*W teorii grawitacja nie powinna być słaba. W praktyce tak właśnie jest. Sednem tego paradoksu jest to, że grawitacja z pewnością* wydaje nam się *słaba. Czy to z nami jest coś nie w porządku?*

Grawitację mierzymy, sprawdzając wielkość efektu, jaki wywiera na materię. Obserwowana przez nas siła oddziaływania grawitacyjnego jest wprost proporcjonalna do mas ciał, którymi posługujemy się do przeprowadzenia obserwacji. Masa tych ciał w przeważającej mierze wynika z mas protonów i neutronów, z których się one składają.

Jeśli zatem grawitacja *wydaje się* słaba – jak to zobaczyliśmy na własne oczy – możemy albo winić samą grawitację za to, że jest słabeuszem, albo obwinić protony (i neutrony) za to, że są lekkie.

Przesłanki teoretyczne sugerują, że powinniśmy uważać grawitację za siłę podstawową. Z takiego punktu widzenia grawitacja jest, czym jest – nie można jej wyjaśnić za pomocą czegokolwiek prostszego. Jeśli więc mamy pogodzić ze sobą teorię i praktykę, musimy odpowiedzieć na pytanie:

Dlaczego protony są tak lekkie?

Postawienie właściwego pytania często jest kluczowym krokiem do zrozumienia. Dobre pytania to takie, z którymi możemy sobie

poradzić. Ponieważ rozumiemy już bardzo dobrze, jakie jest pochodzenie masy, jesteśmy gotowi zmierzyć się z pytaniem „Dlaczego protony są tak lekkie?”.

# Rozdział 16

# Piękna odpowiedź

*Dlaczego protony są tak lekkie? Ponieważ rozumiemy, skąd się bierze masa protonu, możemy udzielić na to pytanie pięknej odpowiedzi. Odpowiedź ta usuwa jedną z głównych przeszkód na drodze do stworzenia zunifikowanej teorii sił i zachęca nas, byśmy takiej teorii poszukiwali.*

Przypomnijmy krótko, skąd bierze się masa protonu, zwracając przy tym uwagę na wszystko, co mogłoby powodować, że masa ta jest mała. (Jest to podsumowanie fragmentu rozdziału dziesiątego).

Masa protonu jest kompromisem między dwoma przeciwstawnymi efektami. Przenoszony przez kwarki ładunek koloru zakłóca pola gluonowe. Zaburzenie to jest na początku małe, ale rośnie wraz z odległością od kwarka. Do wywołania zakłóceń w polu gluonowym potrzebna jest energia. Stany stabilne to takie, z którymi związana jest jak najmniejsza energia – zatem musimy jakoś przerwać te kosztowne energetycznie zaburzenia. Wpływ ładunku koloru kwarka można zniwelować, umieszczając w jego pobliżu antykwark o przeciwnym ładunku koloru albo – i tak to się dzieje wewnątrz protonów – dwa dodatkowe kwarki o dopełniających ładunkach koloru. Jeśli kwarki te umieścimy dokładnie na pierwotnym kwarku, nie dojdzie do żadnego zaburzenia. W ten sposób oczywiście osiągniemy (zerowe) zaburzenie o najniższej możliwej energii (zerowej).

Mechanika kwantowa obarcza nas jednak w tym miejscu innym kosztem energetycznym, który zmusza do szukania kompromisu. Zgodnie z tą teorią kwark (albo dowolna inna cząstka) nie ma określonego położenia. Ma rozkład możliwych położeń, który opisuje jego funkcja falowa. Czasami mówimy o korpuskularno-falowej naturze obiektów kwantowych, podkreślając w ten sposób podstawowy aspekt teorii. Jeżeli chcemy zmusić korpuskularno-falowy kwark do przyjęcia stanu o wąskim rozkładzie położeń, musimy się zgodzić na to, że może mieć on dużą energię. Krótko mówiąc, określenie położenia kwarka wymaga energii. Całkowite zniesienie zaburzenia, które przed chwilą rozważaliśmy, wymaga, by kwarki o dopełniających ładunkach miały takie samo położenie jak oryginalny kwark. To się jednak nie uda, ponieważ koszt energetyczny ustalenia ich położenia jest zaporowy.

Musi więc dojść do kompromisu. W takim polubownym rozwiązaniu będzie występowała pewna szczątkowa energia nie do końca zrównoważonego zaburzenia oraz resztkowa energia wynikająca z tego, że położenie kwarków jest do pewnego stopnia określone. Masa protonu wynika z sumarycznej wartości tych energii $E$ i jest dana drugim prawem Einsteina: $m = E/c^2$.

W tym wyjaśnieniu najnowszym i najtrudniejszym elementem jest to, jak zaburzenie w polu gluonowym rośnie wraz z odległością. Ma to ścisły związek ze swobodą asymptotyczną, której odkrycie przyniosło niedawno trzem szczęściarzom Nagrodę Nobla[88]. Jak wyjaśniłem wcześniej, swoboda asymptotyczna jest subtelnym efektem sprzężenia zwrotnego, którego źródło stanowią cząstki wirtualne. Można sobie je wyobrażać jako pewną formę „polaryzacji próżni", w której byt nazywany przez nas pustą przestrzenią – Siatka – antyekranuje narzucony jej ładunek. *Odwet Siatki*, *Siatka poza wszelką kontrolą*, *Oszalała Siatka* – to świetne tytuły horrorów dla inteligentnych ludzi.

Rzeczywistość jednak jest umiarkowana. Antyekranowanie narasta stopniowo, szczególnie na początku. Jeżeli zalążek (ładunek koloru) jest mały, efekt, jaki wywiera na Siatkę, jest na początku niewielki. To sama Siatka w wyniku antyekranowania powiększa wypadkową

wartość ładunku, dlatego kolejny krok w procesie narastania antyekranowania jest trochę szybszy i tak dalej. W końcu zaburzenie urasta do dużych rozmiarów, staje się zagrożeniem i należy je wygasić. To jednak może chwilę potrwać – to znaczy, trzeba być może oddalić się na znaczną odległość od kwarka będącego zalążkiem, zanim do takiego wygaszenia dojdzie.

Jeżeli zaburzenie narasta powoli, wtedy presja na dokładne umiejscowienie znoszących je kwarków jest względnie mała. Nie musimy umieszczać ich z dużą dokładnością. Dlatego energie związane zarówno z zaburzeniem, jak i umiejscowieniem kwarków są małe – a co za tym idzie, mała też jest masa protonu.

Dlatego właśnie protony są tak lekkie!

To, co wam w tej chwili przedstawiłem, jest tak zwanym *wyjaśnieniem przez machanie rękami*. Nie widzieliście tego, ale podczas pisania powyższego fragmentu często przerywałem, by żywo gestykulować – wyraźnie widać tu wpływ moich włoskich przodków[89]. Feynman słynął z przedstawiania wywodów przez machanie rękami. Kiedyś wyjaśnił Pauliemu swoją teorię nadciekłego helu, stosując taką właśnie technikę. Pauli, twardy krytyk, pozostał nieprzekonany. Feynman brnął dalej, a Pauli wciąż miał zastrzeżenia, aż w końcu Feynman wyczerpany zapytał:

– Nie uważasz chyba, że wszystko, co powiedziałem, jest błędne?

– Sądzę, że wszystko, co powiedziałeś – odpowiedział Pauli – nie jest nawet błędne[90].

Aby podać wyjaśnienie, które może być chociaż błędne, musimy przedstawić dużo więcej konkretów. Gdy mówimy, że protony są lekkie, co rozumiemy przez „lekkie”? Jakie są konkretne liczby? Czy naprawdę możemy wyjaśnić *śmieszną* słabość grawitacji, z którą, jak pamiętacie, wiążą się niesamowicie małe liczby?

## Wizja Pitagorasa, jednostki Plancka

Przypuśćmy, że mamy znajomego w galaktyce w Andromedzie, z którym możemy się komunikować, jedynie wysyłając mu SMS-y. W jaki sposób przekazalibyśmy mu opisujące nas liczby – wzrost, wagę i wiek? Ów znajomy nie ma dostępu do ziemskich linijek, wag czy zegarów, nie możemy więc po prostu napisać: „Mam tyle i tyle centymetrów wzrostu, ważę tyle a tyle kilogramów oraz liczę sobie tyle i tyle lat". Potrzebne są nam jakieś powszechne jednostki miary.

W latach 1899–1900 Maxa Plancka pochłaniały badania, które zapoczątkowały teorię kwantową. Kulminacyjny moment nastąpił w grudniu 1900 roku, gdy wprowadził słynną stałą *h* – stałą Plancka – pojawiającą się w podstawowych równaniach mechaniki kwantowej, którymi się obecnie posługujemy. Krótko przed tym wygłosił przemówienie przed czcigodną Pruską Akademią Nauk w Berlinie, w którym postawił to samo co my przed chwilą pytanie. (Chociaż nie mówił o przesyłaniu SMS-ów). Nazwał je problemem zdefiniowania *jednostek bezwzględnych*. Plancka pociągało w tych badaniach wcale nie przeczucie, że mogą one prowadzić do odkrycia tajemnicy atomu, obalenia klasycznej logiki czy ustalenia podwalin fizyki. Wszystko to nastąpiło później i za sprawą innych. Pobudzało go do działania to, że widział sposób na rozwiązanie problemu bezwzględnych jednostek.

Problem ten może się wydawać akademicki, ale bliski jest sercu filozofów, mistyków i filozoficznie nastawionych naukowców-mistyków.

Manifest fizyki XX (i XXI) wieku ogłoszono na długo przed Planckiem, około roku 600 p.n.e., gdy Pitagoras z Samos opowiedział o swojej zdumiewającej wizji. Badając dźwięki wydobywające się po szarpnięciu struny, Pitagoras odkrył, że ludzkie poczucie harmonii jest powiązane ze stosunkami liczbowymi. Zbadał struny wykonane z takiego samego materiału, o takiej samej grubości i naprężone z taką samą siłą, ale o różnych długościach. Odkrył wówczas, że dźwięki współbrzmią ze sobą, gdy stosunek długości strun można wyrazić za pomocą małych liczb całkowitych. Na przykład stosunek długości 2:1 daje dźwięki oddalone od siebie o oktawę, 3:2 – kwintę, a 4:3 – kwartę. Sentencja „Wszystko jest liczbą" dobrze podsumowuje jego wizję.

Ponieważ upłynęło już tak wiele czasu, trudno mieć pewność, co tak naprawdę miał na myśli Pitagoras. Zapewne częścią jego wizji była jakaś postać atomizmu opierającego się na idei konstruowania figur geometrycznych z liczb. Używane obecnie określenia „kwadrat" oraz „sześcian" liczby wywodzą się właśnie z tej idei. Nasza konstrukcja „bytu z bitów" w pełni realizuje pogląd, że „Niektóre ważne rzeczy są liczbą". Tak czy inaczej, jeżeli będziemy rozumieć ją dosłownie, sentencja Pitagorasa z pewnością posuwa się za daleko. Abstrakcyjne liczby takie jak „3" nie mają długości, masy ani czasu trwania. Same liczby nie mogą stanowić jednostek fizycznych umożliwiających pomiary; nie mogą tworzyć linijek, wag ani zegarów.

Stawiając problem jednostek bezwzględnych, Planck obrał sobie za cel tę właśnie kwestię. W naszej cyfrowej epoce przyzwyczailiśmy się do tego, że informację, jak w przypadku wiadomości tekstowych, można zakodować w postaci ciągu liczb (konkretnie – zer i jedynek). Planck zadał więc takie pytanie: Czy liczby wystarczają, jeśli nie do skonstruowania, to przynajmniej do *opisania* każdego fizycznie istotnego aspektu ciał materialnych – czyli, innymi słowy, do opisania „wszystkiego", co wiąże się z ciałami materialnymi? W szczególności czy możemy wyrazić miary długości, masy i czasu jedynie za pomocą liczb?

Planck zauważył, że chociaż mieszkańcy galaktyki w Andromedzie nie mają dostępu do naszych linijek, wag i zegarów, to mogą jednak poznać nasze prawa fizyki, które są takie same jak ich. Mogliby w szczególności zmierzyć trzy stałe uniwersalne:

*c*: prędkość światła

*G*: newtonowską stałą grawitacji. W teorii Newtona jest ona miarą siły oddziaływania grawitacyjnego. Dokładniej rzecz biorąc, prawo grawitacji Newtona mówi, że siła działająca między dwoma ciałami o masach $m_1$ oraz $m_2$, oddalonymi od siebie na odległość $r$, jest równa $Gm_1m_2/r^2$;

*h*: stałą Plancka.

(Tak naprawdę Planck posłużył się nieco inną wartością niż współczesna stała *h*, której jeszcze wówczas nie wymyślił).

Z tych trzech wartości, podnosząc je do potęgi i dzieląc przez siebie, można uzyskać jednostki długości, masy i czasu. Nazywa się je *jednostkami Plancka*. Oto one:

$L_P$: długość Plancka. Jej wzór to: $\sqrt{\frac{hG}{c^3}}$. Jej wartość: $1{,}6 \times 10^{-33}$ centymetra;

$M_p$: masa Plancka. Jej wzór to: $\sqrt{\frac{hc}{G}}$. Jej wartość: $2{,}2 \times 10^{-5}$ grama;

$T_P$: czas Plancka. Jego wzór to: $\sqrt{\frac{hG}{c^5}}$. Jego wartość: $5{,}4 \times 10^{-44}$ sekundy.

Oczywiście jednostki Plancka nie nadają się specjalnie do codziennego użytku. Długość i czas są śmiesznie małe, nawet gdy stosuje się je w fizyce subatomowej. Długość Plancka wynosi na przykład 1/100 000 000 000 000 000 000 ($10^{-20}$) rozmiaru protonu. Masa Plancka, 22 mikrogramy, nie jest już tak niepraktyczna. Dawki witamin na przykład często mierzy się w mikrogramach. Moglibyście więc pójść do sklepu ze zdrową żywnością i poszukać suplementu diety zawierającego masę Plancka witaminy $B_{12}$. W fizyce cząstek jednak masa Plancka jest szalenie duża; w przybliżeniu jest ona równa masie 10 000 000 000 000 000 000 ($10^{19}$) protonów.

Pomimo ich niepraktyczności Planck był dumny, że jego jednostki opierają się na wartościach pojawiających się w powszechnie obowiązujących (jak sądzimy) prawach fizyki. Są one, używając jego określenia, jednostkami bezwzględnymi. Możemy się nimi posłużyć do rozwiązania palącego problemu przesłania znajomemu

w galaktyce w Andromedzie wiadomości tekstowej z naszymi parametrami liczbowymi. Wystarczy, że wyrazimy nasz wzrost, wagę i czas trwania (to znaczy, wiek) w – dużych! – wielokrotnościach odpowiednich jednostek Plancka.

W miarę rozwoju fizyki w XX wieku jednostki Plancka nabrały jeszcze większego znaczenia. Fizycy uświadomili sobie, że każda z użytych przez niego wartości – *c*, *G* oraz *h* – odgrywa rolę przelicznika potrzebnego, gdy chcemy wyrazić jakieś głębokie fizyczne pojęcie:

- Szczególna teoria względności zakłada istnienie działań opartych na symetrii (chodzi o nasze „pchnięcie", znane również jako transformacja Lorentza) mieszających ze sobą przestrzeń i czas. Jednak przestrzeń i czas mierzy się w różnych jednostkach, aby więc takie pojęcie miało sens, musi istnieć łączący je przelicznik – a *c* świetnie się do tego nadaje. Jeśli pomnożymy czas przez *c,* otrzymamy długość.
- Teoria kwantowa postuluje istnienie odwrotnie proporcjonalnej relacji między długością fali a pędem oraz wprost proporcjonalnej między częstotliwością a energią – są to przejawy dualizmu korpuskularno-falowego. Również te pary wartości mierzy się w różnych jednostkach, dlatego musimy się posłużyć stałą *h*, która pełni tu funkcję przelicznika.
- Ogólna teoria względności głosi, że gęstość energii-pędu wywołuje zakrzywienie czasoprzestrzeni, ale krzywiznę i gęstość energii mierzy się w różnych jednostkach, dlatego trzeba wykorzystać stałą *G* w roli przelicznika.

W ramach tych idei *c*, *h*, oraz *G* zdobyły niezwykle wysoki status. Stałe te umożliwiają istnienie głębokich zasad fizyki, które bez nich nie miałyby sensu.

## Weryfikacja unifikacji

Z pomocą jednostek Plancka możemy ocenić, w jakim stopniu nasze rozumienie pochodzenia masy protonu wyjaśnia słabość

grawitacji. Wydawało się, że słabość oddziaływania grawitacyjnego stoi na drodze do unifikacji, możemy więc również sprawdzić, czy zrozumienie to pozwoli nam usunąć tę przeszkodę.

Jeśli mamy skonstruować zunifikowaną teorię, której głównymi składnikami będą dwie teorie względności: szczególna i ogólna oraz mechanika kwantowa, to powinniśmy wykazać, że najbardziej podstawowe, fundamentalne prawa fizyki wyglądają zupełnie naturalnie, gdy wyrazi się je w jednostkach Plancka. Nie powinny się w nich pojawić ani bardzo duże, ani bardzo małe liczby.

Sednem problemu z obserwowaną słabością grawitacji jest fakt, że masa protonu jest bardzo mała w *jednostkach Plancka*. Doszliśmy jednak do przekonania, że masa ta nie jest bezpośrednim odzwierciedleniem najbardziej podstawowych praw fizyki. Jest ona wynikiem kompromisu między energią pola gluonowego a energią ustalenia położenia kwarka. Fizyczną *podstawą* determinującą masę protonu – zjawiskiem decydującym o całym procesie – jest podstawowa jednostka ładunku koloru. To siła zalążka (ładunku koloru) decyduje o tym, jak szybko rozrost energii pola gluonowego staje się zagrożeniem; tym samym również o tym, jak mocne uderzenie – w energii lokalizacji cząstki – muszą wziąć na siebie kwarki, żeby zrównoważyć zaburzenie; a z tego wynika, że decyduje ona również o wartości masy protonu – zgodnie z drugim prawem Einsteina.

Czy to możliwe, by rozsądna wartość ładunku koloru będącego zalążkiem zaburzenia prowadziła do obserwowanej, bardzo małej – w jednostkach Plancka – wartości masy protonu? By odpowiedzieć na to pytanie, musimy oczywiście określić, co uważamy za *rozsądną* wartość takiego zalążkowego ładunku koloru. Aby zmierzyć siłę podstawowego ładunku zalążkowego, musimy rozważyć najważniejsze efekty fizyczne, jakie wywołuje. Moglibyśmy wziąć pod uwagę dowolny z kilku efektów: wytwarzaną przez niego siłę, energię potencjalną czy (dla znawców tematu) przekrój czynny. Jeśli tylko będziemy wszystko mierzyli w odległościach Plancka z wykorzystaniem jednostek Plancka, uzyskamy w każdym przypadku podobne odpowiedzi. Ponieważ najbardziej obrazowym i znanym

nam efektem jest siła wytwarzana przez ładunek, skupmy się na tym właśnie przypadku.

Według Plancka zatem ładunek zalążkowy ma rozsądną wartość, jeśli między kwarkami oddalonymi na odległość Plancka prowadzi do powstania siły, która nie jest ani niezwykle mała, ani przesadnie duża, gdy zmierzy się ją w jednostkach Placka. To jasne, że tak właśnie by powiedział. Chodzi tutaj nie o autorytet Plancka, ale o ideę, której ucieleśnieniem są jego jednostki: ideę, że szczególną teorię względności, mechanikę kwantową oraz grawitację (ogólną teorię względności) można połączyć z innymi oddziaływaniami. Odwróćmy to zagadnienie i zapytajmy, czy *zakładając* prawdziwość tej idei, możemy w sposób przekonujący wyjaśnić, dlaczego protony są lekkie, a tym samym również, dlaczego grawitacja w praktyce jest tak słaba?

Ostatecznie więc wszystko sprowadza się do bardzo konkretnego liczbowego pytania: Czy rząd wielkości wytwarzanego przez ładunek zalążkowy oddziaływania silnego, działającego między kwarkami oddalonymi od siebie na odległość Plancka i wyrażonego w jednostkach Plancka, jest bliski jedności?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, musimy dokonać ekstrapolacji znanych nam praw fizyki na odległości znacznie mniejsze od tych, na których udało nam się doświadczalnie zweryfikować ich działanie. Odległość Plancka jest bardzo mała. Wiele rzeczy może się nie udać. Mimo to, postępując w duchu reguły jezuitów: „lepiej prosić o przebaczenie, niż pytać o pozwolenie", zróbmy to.

Obliczenia, jakie należy przeprowadzić, są tak naprawdę dosyć proste jak na standardy współczesnej fizyki teoretycznej. Wszystkie potrzebne do tego idee już wcześniej omówiliśmy. Serce mi się kraje, że nie mogę przedstawić tu odpowiednich wzorów, ale jestem litościwym człowiekiem, a poza tym wydawca radził mi, abym tego nie robił. Przytoczę zatem jedynie wynik.

Okazuje się, że siła oddziaływania silnego ładunku zalążkowego[91] działającego między dwoma kwarkami w skali Plancka, zmierzona w jednostkach Plancka, wynosi około 1/25. To całkiem przyzwoity wynik, jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że wcześniej

podejrzewaliśmy rozbieżność rzędu ponad 1/10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000!

Tym samym wyjaśniliśmy (pozorną) słabość grawitacji, wykorzystując fundamentalną, nową, ale dobrze ugruntowaną fizykę. Pokonaliśmy również główną przeszkodę stojącą na drodze do zunifikowanej teorii sił.

## Dalsze kroki

Mam nadzieję, że zgodzicie się ze mną, iż jest to bardzo piękna opowieść i że wiąże się w logiczną całość. W historii zdarzało się, że meldowano wykonanie zadania, mając po temu znacznie gorsze podstawy.

Trudno jednak pozbyć się uczucia niepokoju, gdy wyciąga się dalekosiężne wnioski z tak wąskiego zbioru przesłanek. Przypomina to budowanie odwróconej piramidy opierającej się na ziemi tylko w jednym punkcie. Aby ją umocnić, musimy poszerzyć nasz fundament.

Najbardziej przekonującym sposobem wykazania, że pokonało się przeszkody, jest ukończenie biegu. Droga do unifikacji stoi przed nami otworem. Pójdźmy nią.

88 W 2004 otrzymałem Nagrodę Nobla wspólnie z Davidem Grossem i Davidem Politzerem za „odkrycie swobody asymptotycznej w oddziaływaniach silnych”.

89 Chodzi o moją mamę. Ojciec ma polskie korzenie.

90 Ta opowieść o spotkaniu Feynmana i Pauliego jest już legendarna w świecie fizyki. Nie wiem, czy rzeczywiście do niego doszło, i mówiąc szczerze, nawet nie chcę wiedzieć. Lepiej, by ta anegdota nie była nawet błędna.

91 Wybór oddziaływania jako miary siły sprzężenia jest w pewnym stopniu arbitralny. Może bardziej podstawową miarą jest liczba pojawiająca się jako mnożnik w wierzchołkach diagramów Feynmana opisujących proces związany z cząstkami o energii i pędzie Plancka. Liczba ta jest jeszcze bliższa jedności;

wynosi około 1/2. Dowolna sensowna miara da wynik bliski jedności – na pewno *znacznie* bliższy niż liczba $10^{-40}$!

# Część III

# Czy piękno jest prawdą?

Znaleźliśmy logiczne i piękne wyjaśnienie słabości grawitacji. Czy jednak jest ono prawdziwe? Aby udowodnić – albo nie – jego prawdziwość i przydatność, musimy umiejscowić je w szerszym kręgu idei i podać możliwe do sprawdzenia konsekwencje.

Natura, jak się zdaje, utwierdza nas w przekonaniu, że skonstruowanie zunifikowanej teorii oddziaływań podstawowych jest możliwe. Wyjaśnienie słabości grawitacji bardzo ładnie się w to wpisuje. Jednak aby móc cieszyć się unifikacją w pełni, w szczegółach, musimy założyć istnienie nowego świata cząstek. Niektóre z nich powinny się zmaterializować w LHC (Wielkim Zderzaczu Hadronów, *Large Hadron Collider*), akceleratorze zbudowanym w pobliżu Genewy. Jedna z nich występuje być może powszechnie w całym Wszechświecie, tworząc jego ciemną materię.

# Rozdział 17

# Unifikacja: śpiew syreny

*Znane cząstki i oddziaływania tworzą fragmentaryczne obrazy.*
*W całość może połączyć je rozszerzona teoria, opierająca się*
*na tych samych zasadach, ale obejmująca potężniejszą symetrię.*

Przekonaliśmy się, że podążając za wskazówkami dobrze ugruntowanych praw fizyki, doszliśmy do głębokiego wyjaśnienia jednego z klasycznych problemów tej dziedziny: Dlaczego grawitacja jest tak słaba?

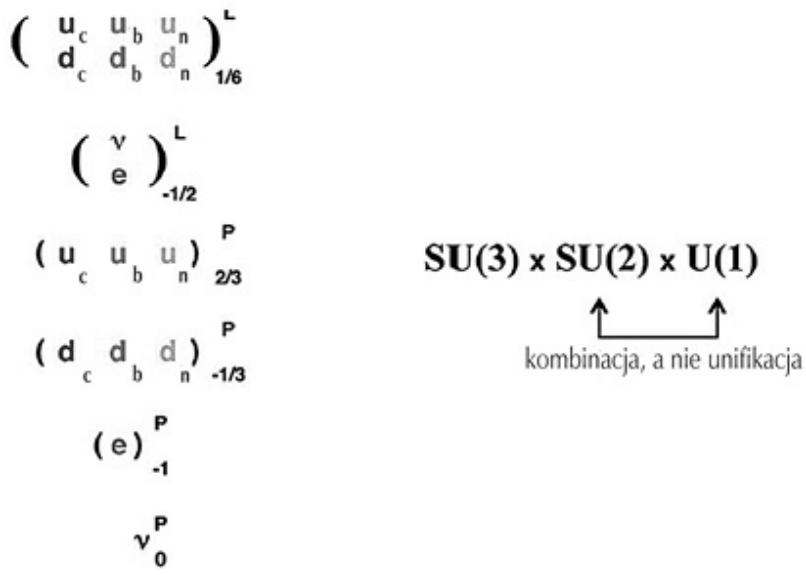
Niestety, w celu uzyskania tej odpowiedzi musieliśmy ekstrapolować działanie dobrze poznanych praw na odległości znacznie mniejsze od tych, na których możemy mieć nadzieję na bezpośrednie potwierdzenie ich poprawności. Można też użyć stwierdzenia równoważnego[92], że musieliśmy ekstrapolować działanie tych praw na energie znacznie wyższe od tych, w których możemy mieć nadzieję na przeprowadzenie doświadczeń – mówimy tu o energiach dosłownie „miliony miliardów" ($10^{15}$) razy większych od osiągalnych w najnowszym i największym akceleratorze LHC, który kosztował wiele miliardów euro. Zatem nasze wyjaśnienie stoi pewnie – na niesprawdzonym fundamencie!

Nie musimy z rezygnacją się na to godzić. Możemy poszukać innych sposobów dotarcia do fizyki unifikacji i zajrzenia na niezwykle małe odległości oraz w niezmiernie wysokie energie. Najprostsza droga jest zablokowana. Z przyczyn praktycznych nie możemy cząstek rozpędzać i zderzać ze sobą z odpowiednio dużymi energiami. Możemy jednak poszukać dodatkowych śladów unifikacji

– niewyjaśnionych prawidłowości w świecie, do którego mamy dostęp.

Prawidłowości takie istnieją. Spójrzcie proszę na rysunki 17.1 oraz 17.2.

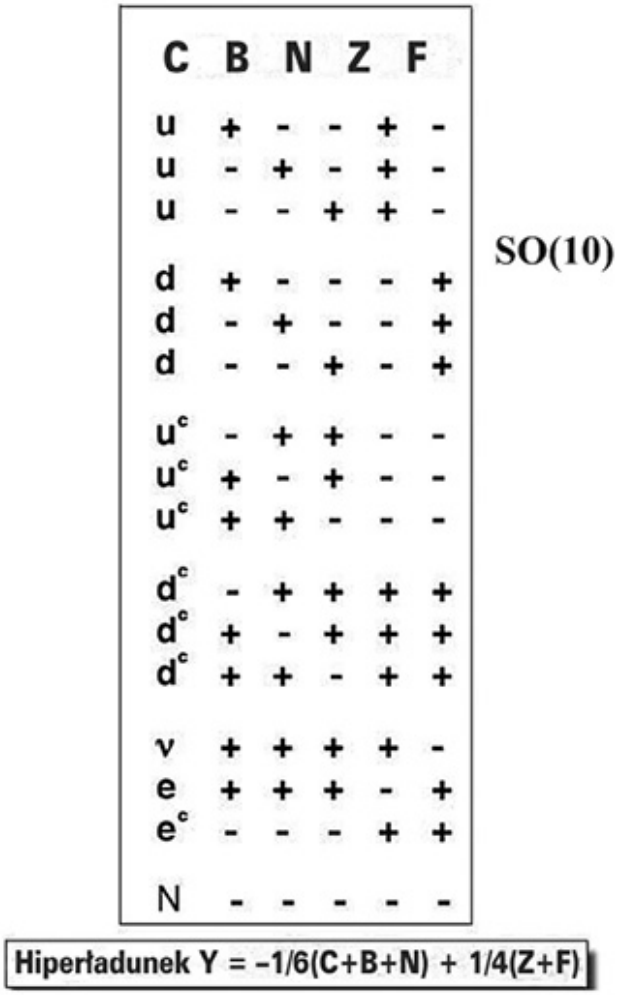
Na rysunku 17.1 pokazano układ cząstek sporządzony na podstawie przeprowadzonych obserwacji – jest to tak zwany Model Standardowy (obejmujący QCD). *Model Standardowy* to zbyt skromna nazwa dla jednego z największych osiągnięć ludzkości. Podsumowuje on, w niezwykle zwartej formie, prawie wszystko, co wiemy o podstawowych prawach fizyki[93]. Znajdują się w nim wszystkie zjawiska z obszaru fizyki jądrowej, chemii, materiałoznawstwa i elektroniki. I w przeciwieństwie do żartobliwego równania Feynmana $N = 0$ czy słownych wygibasów klasycznej filozofii rysunkowi temu towarzyszy algorytm pozwalający rozwinąć zaprezentowane symbole w model fizycznego świata. Pozwala on na wysuwanie zadziwiających przewidywań i projektowanie na przykład egzotycznych laserów, reaktorów jądrowych czy superszybkich, niezwykle małych pamięci komputerowych. Ponieważ nie jestem przesadnie skromny, będę od tej chwili nazywał Model Standardowy Rdzeniem.



Rysunek 17.1. Układ cząstek i oddziaływań w Rdzeniu. Od razu rzuca się w oczy fakt, że kwarki i leptony dzielą się na sześć rozłącznych grup, a oddziaływania na trzy.

Trudno przecenić zakres, siłę i wielokrotnie potwierdzoną dokładność Rdzenia. Nie będę więc nawet próbował. Rdzeń przybliża nas do poznania ostatniego słowa Przyrody. Przez długi jeszcze czas – niewykluczone, że zawsze[94] – będzie on stanowił jądro naszego fundamentalnego opisu świata fizycznego.

Na rysunku 17.2 pokazano układ tych samych cząstek i ich własności w ramach teorii zunifikowanej. Sposób włączenia (sprawdzonego) Rdzenia do (hipotetycznej) teorii zunifikowanej nie jest w żadnym wypadku automatyczny. Gdyby pojawiające się w przedstawionym poprzednio układzie Rdzenia asymetryczne kształty i towarzyszące im dziwne liczby były inne, proces ten by się nie udał. Nie moglibyśmy ich ze sobą zunifikować (a przynajmniej nie tak elegancko). Patrząc na to z drugiej strony, powiemy, że za pomocą unifikacji wyjaśniamy owe asymetryczne kształty i dziwne liczby.




Rysunek 17.2. Układ tych samych cząstek i oddziaływań rozszerzony o dodatkowe elementy, tak by tworzył zunifikowaną teorię. Od razu rzuca się w oczy fakt, że kwarki i leptony są połączone w jedną całość, tak samo i oddziaływania.

Przyroda nuci uwodzicielską pieśń. Wsłuchajmy się w nią uważniej…

## Rdzeń: do wyboru, do koloru

W poprzednich rozdziałach wiele mówiliśmy o oddziaływaniu silnym i jego teorii – chromodynamice kwantowej, w skrócie QCD.

Współczesna kwantowa teoria elektryczności i magnetyzmu – elektrodynamika kwantowa, w skrócie QED – jest jednocześnie matką i młodszą siostrą QCD. Matką, ponieważ QED powstała wcześniej i zawierała wiele pojęć, dzięki którym QCD się wykształciła; młodszą siostrą, ponieważ równania QED są prostszą, nie tak potężną wersją równań QCD. O teorii QED również wiele mówiliśmy.

W normalnym biegu wydarzeń w przyrodzie główną rolą oddziaływania silnego jest tworzenie protonów i neutronów z kwarków i gluonów. W ten sposób dochodzi do niemal całkowitego zrównoważenia ładunków koloru, ale ponieważ nie jest ono doskonałe, pozostają pewne resztkowe siły, które wiążą protony i neutrony w jądra atomowe. Z kolei oddziaływanie elektromagnetyczne dołącza do jąder elektrony i w ten sposób powstają atomy. Prowadzi to do niemal całkowitego zrównoważenia ładunków elektrycznych, ale ponieważ nie jest ono doskonałe, pozostają pewne resztkowe siły, które wiążą atomy w cząsteczki, a cząsteczki w substancje. QED opisuje również światło i pokrewne mu formy promieniowania elektromagnetycznego: fale radiowe, mikrofale, podczerwień, ultrafiolet, promieniowanie rentgenowskie i gamma.

Trzecim głównym graczem w Rdzeniu jest oddziaływanie słabe[95]. Odgrywa ono w przyrodzie bardziej subtelną, ale nie mniej ważną rolę. Jest bowiem odpowiedzialne za alchemię. Dokładniej rzecz biorąc, przekształca nawzajem w siebie różne zapachy kwarków, a także różne rodzaje leptonów. Na rysunku 17.1 oddziaływanie słabe dokonuje przekształceń w kierunku pionowym. (Oddziaływanie silne dokonuje przekształceń w poziomie). Jeśli w protonie przekształcimy jeden z kwarków *u* w kwark *d*, stanie się on neutronem. Zmiany powodowane przez oddziaływanie słabe przekształcają zatem jądro atomowe jednego pierwiastka, tak że staje się ono jądrem innego pierwiastka. Reakcje wykorzystujące „alchemię” (lub, używając szacowniejszego określenia, chemię jądrową) oddziaływania słabego mogą prowadzić do uwolnienia energii dużo większych niż w przypadku zwykłych reakcji

chemicznych. Gwiazdy żyją dzięki energii pozyskiwanej z systematycznego przetapiania protonów w neutrony[96].

Zanim bardziej szczegółowo omówimy sedno Rdzenia – oddziaływania silne, elektromagnetyczne i słabe – przedstawmy w kilku słowach to, co (chwilowo) pominiemy. Są to dwa wielkie zagadnienia: grawitacja i masa neutrin.

Jak już mówiliśmy, obserwowana słabość grawitacji wynika zapewne w większym stopniu z naszej szczególnej perspektywy niż z samej istoty tej siły. W kolejnych rozdziałach przekonamy się, że Natura zachęca nas do połączenia grawitacji z pozostałymi oddziaływaniami i traktowania jej jako równorzędnego partnera w unifikacji.

W praktyce włączenie oddziaływań grawitacyjnych do Rdzenia nie sprawia żadnej trudności. Istnieje jeden prosty sposób dokonania tego, który się świetnie sprawdza. (Uwaga dla znawców tematu: należy zastosować działanie Einsteina–Hilberta do pola metrycznego, a do pól materii – minimalne sprzężenie i przeprowadzić kwantowanie w płaskiej przestrzeni). Astrofizycy zupełnie rutynowo w czasie swojej normalnej pracy posługują się równocześnie ogólną teorią względności i resztą Rdzenia (i odnoszą przy tym duże sukcesy). Podobnie wszyscy, którzy korzystają z systemu GPS.

Krótko mówiąc: przyjęty zwyczaj oddzielania grawitacji od Rdzenia jest wygodny, ale chyba powierzchowny.

W 1998 roku ustalono, że neutrina mają niezerową masę, chociaż już w latach sześćdziesiątych istniały wskazówki pozwalające wysnuć taki wniosek. Wartości masy neutrin są bardzo małe. Najcięższe z trzech typów tych cząstek mają masę nie większą niż jedna milionowa masy elektronu – drugiej po neutrinach najlżejszej znanej nam cząstki. Neutrina są znane ze swojej nieuchwytności i widmowego charakteru. Około 50 bilionów tych cząstek przechodzi w ciągu każdej sekundy przez ciało każdego z nas, a my tego nawet nie zauważamy. John Updike napisał wiersz o neutrinach zaczynający się tymi słowami:

Neutrina to cząstki bardzo małe, Nie mają ładunku, nie mają masy I nie oddziałują wcale. Ziemię traktują jak głupią kulę, Mknąc przez dolinę i górski masyw Jak pokojówki przez puste hole Lub foton, co w szkle nie zmienia trasy.

Mimo to dzięki wytężonym wysiłkom fizykom doświadczalnym udało się dosyć szczegółowo zbadać własności neutrin[97].

Zerowe masy neutrin świetnie pasowały do Rdzenia, doskonale się mieściły w jego ogólnej strukturze. Jeśli zechcemy uwzględnić niezerowe masy neutrin, to będziemy musieli dodać do Rdzenia nowe cząstki o egzotycznych własnościach, za których istnieniem nie przemawia żaden inny powód czy wynik eksperymentów. Gdy rozszerzymy Rdzeń tak, by powstała teoria zunifikowana, sprawy przybiorą zupełnie inny obrót. W takiej sytuacji owe nowe cząstki staną się krewnymi cząstek już nam znanych – synami marnotrawnymi powracającymi do domu, dzięki którym rodzina znów jest w komplecie. A ich egzotyczne zachowanie będzie wspomnieniem przygód w dalekich, romantycznych miejscach.

Powinienem jeszcze wspomnieć o dwóch komplikacjach, które potraktuję dosyć pobieżnie. Odbiegają one od naszego głównego tematu, ale całkowite ich zignorowanie byłoby nie na miejscu. Nie pozwólcie, by te powierzchowne komplikacje was przeraziły bądź zniechęciły: musimy wiedzieć o ich istnieniu, ale nie pozwolimy, żeby zaciemniły nam obraz.

Pierwszą z nich są masy i konfiguracje bozonów cechowania. W podstawowych równaniach występują trzy grupy pól z cechowaniem. Jest osiem pól gluonów, z którymi już się spotkaliśmy. Kolejne trzy pola związane są z symetrią oddziaływania słabego – pola te, zwane $W^+$, $W^-$ oraz $W^0$, są względem siebie symetryczne. W końcu istnieje również jeden osamotniony, obdarzony „hiperładunkiem” bozon cechowania $B^0$. Nadprzewodnictwo Siatki nadaje niezerowe masy cząstkom tworzonym przez pola $W^+$ i $W^-$, a także przez pewne kombinacje pól $W^0$ i $B^0$. Zaburzenia w takiej mieszaninie powodują powstanie masywnych cząstek, zwanych bozonami $Z$, inaczej zetonami.

Zakłócenia w innym złożeniu pól $W^0$ i $B^0$ (dla znawców: złożeniu ortogonalnym) nie mają masy. Owym bezmasowym złożeniem $W^0$ i $B^0$ jest foton.

Podsumujmy: z punktu widzenia matematyki symetrii najbardziej naturalne są pola $W^0$ i $B^0$. Gdy jednak weźmie się pod uwagę nadprzewodnictwo Siatki, wówczas z mieszanką pól $W^0$ i $B^0$ wiążą się zaburzenia posiadające określoną masę. Jednym typem zaburzenia jest zeton o niezerowej masie; innym – bezmasowy foton.

Mówi się czasami, że Rdzeń łączy ze sobą elektromagnetyzm i oddziaływanie słabe. Stwierdzenie takie jest mylące. W grę wchodzą jeszcze dwa inne oddziaływania związane z różnymi symetriami. W teorii opisującej Rdzeń są one ze sobą wymieszane, a nie zunifikowane.

Drugą komplikacją są masy i konfiguracje kwarków i leptonów. Cząstki te występują w trzech różnych odmianach zwanych „rodzinami". I tak, oprócz najlżejszej rodziny zawierającej kwarki *u* oraz *d*, elektron *e* i neutrino elektronowe $\nu_e$, istnieją jeszcze dwie cięższe rodziny. Druga z nich zawiera kwark powabny *c* i dziwny *s*, mion $\mu$ i neutrino mionowe $\nu_\mu$. W końcu trzecia rodzina składa się z kwarka wysokiego *t* i niskiego *b*, leptonu tau (taonu) $\tau$ i neutrina taonowego $\nu_T$.

Podobnie jak bozony cechowania, wszystkie te cząstki bez nadprzewodnictwa Siatki byłyby bezmasowe. Jednak nadprzewodnictwo to nadaje im masę[98], a także pozwala, by cięższe z nich mieszały się w skomplikowany sposób z lżejszymi – a tym samym i rozpadały się na nie. Te masy i mieszanki są niezwykle interesujące dla ekspertów, a zrozumienie opisujących je wartości pozostaje wyzwaniem fizyki teoretycznej, któremu nikt jeszcze nie sprostał. Nie znamy też odpowiedzi na znacznie prostsze pytanie: Dlaczego w ogóle istnieją trzy rodziny?

Ponieważ w tych kwestiach nie mam nic specjalnie ciekawego do powiedzenia, nie będę się silił na opisywanie ich szczegółów. Byłoby to jedynie niepotrzebnym odwróceniem uwagi od innych interesujących idei, które chcę omówić. Postaram się więc,

by wszystko było możliwie najprostsze – a niewykluczone, że jeszcze prostsze. *Anna Karenina* Lwa Tołstoja rozpoczyna się słynnym stwierdzeniem: „Wszystkie szczęśliwe rodziny są do siebie podobne (…)”[99]. Skoro tak, skupmy uwagę tylko na jednej.

Uff! Uzyskanie prostoty jest całkiem skomplikowane. Gdy jednak odłożyliśmy na razie na strych te dwa dziwne prezenty grawitacji i mas neutrin, posprzątaliśmy trochę po mieszankach sporządzonych przez nadprzewodnictwo Siatki i doszliśmy do wniosku, że jedna rodzina wystarczy, zaczyna się wyłaniać wyraźny obraz. To właśnie widać na rysunku 17.1. Tak wygląda sedno Rdzenia.

Mamy trzy symetrie: *SU*(3), *SU*(2) i *U*(1). Odpowiadają one oddziaływaniom, kolejno, silnemu, słabemu i elektromagnetycznemu[100].

*SU*(3) jest symetrią trzech rodzajów ładunku koloru, o których już mówiliśmy. Występuje razem z ośmioma bozonami cechowania, które zmieniają ładunki koloru lub na nie reagują. Na rysunku 17.1 symetria ta działa w kierunku poziomym.

*SU*(2) jest symetrią dwóch dodatkowych rodzajów ładunku koloru. Na rysunku 17.1 działa ona w kierunku pionowym.

Zwróćcie uwagę na to, że każda z cząstek po lewej stronie jest wymieniona dwukrotnie. Każda z nich pojawia się raz w jednej grupie ze znacznikiem L, a drugi raz w innej grupie ze znacznikiem P. Znaczniki te odnoszą się do wartości wielkości nazywanej *chiralnością* cząstek: litera L oznacza cząstki lewochiralne, a P – prawochiralne[101]. Chiralność cząstek wyjaśniono na rysunku 17.3. Cząstki lewochiralne oddziałują inaczej niż prawochiralne. Fakt ten nosi nazwę łamania parzystości. Jako pierwsi uświadomili to sobie w 1956 roku Tsung-Dao Lee i Chen Ning Yang i za to odkrycie otrzymali Nagrodę Nobla możliwie najszybciej – już w 1957 roku.

Rysunek 17.3. O tym, czy cząstka jest lewo- czy prawochiralna, decyduje ułożenie spinu względem kierunku jej ruchu.

*U*(1) dotyczy tylko jednego rodzaju ładunku. Działanie tej symetrii na różne cząstki określamy zgodnie z tym, jak silnie i z jakim znakiem jej jedyny bozon – w zasadzie foton – sprzęga się z każdą z nich. Właśnie o tym mówią małe liczby przypisane do każdej grupy cząstek. Na przykład przy prawochiralnym elektronie widnieje liczba –1, ponieważ jego ładunek elektryczny wynosi właśnie –1 (w jednostkach, w których ładunek protonu jest równy +1). Największa, sześcioelementowa grupa zawiera kwarki *u* oraz *d* w każdym z trzech ładunków koloru. Kwarki *u* mają ładunek elektryczny 2/3, a kwarki *d* – 1/3, zatem średni ładunek elektryczny w tej grupie jest równy 1/6 i taka właśnie liczba przy niej widnieje.

I to wszystko. Jak wcześniej zauważyłem, trudno przecenić siłę i wielkość Rdzenia. Na początku przedstawione tu reguły mogą wydawać się nieco skomplikowane, ale to nic w porównaniu (na przykład) z odmianą kilku nieregularnych czasowników łacińskich czy francuskich. I w przeciwieństwie do tego ostatniego przypadku

skomplikowanie Rdzenia ma swoje uzasadnienie. Wymusza je na nas rzeczywistość odkrywana w doświadczeniach.

## Analiza krytyczna

Zapis nutowy pieśni Natury, takiej, jak ją słyszymy, przedstawiono na rysunku 17.1. Zarejestrowaliśmy ją i udało się nam skompresować nagranie do niezwykle małych rozmiarów. To wielkie osiągnięcie jest podsumowaniem całych stuleci znakomitej pracy.

Jeśli weźmie się jednak pod uwagę najwyższe standardy estetyki, to okaże się, że wiele jeszcze trzeba poprawić. Gdyby na to dzieło spojrzał Salieri, z pewnością nie byłby aż tak zachwycony, by wyszeptać: „Usunięcie jednej nuty stanowiłoby ujmę". Powiedziałby raczej: „Ciekawy szkic, ale trzeba jeszcze nad nim popracować".

A może, wiedząc, że patrzy na dzieło mistrza, wykrzyknąłby: „Natura powierzyła swoje dzieło przedziwnemu kopiście!".

Po pierwsze, istnieją trzy niepowiązane ze sobą oddziaływania. Wszystkie opierają się na tych samych zasadach symetrii i oddziałują z ładunkami, te jednak należą do trzech oddzielnych grup, których nie można wzajemnie w siebie przekształcić. Po drugie, istnieją przekształcenia (wykorzystujące gluony ładunku koloru teorii QCD) pozwalające zamieniać między sobą czerwone, białe i niebieskie ładunki koloru, są też inne transformacje (wykorzystujące bozony *W* i *Z*), które umożliwiają zamianę między sobą zielonych i fioletowych ładunków koloru. Ładunek elektryczny natomiast jest czymś zupełnie oddzielnym.

Sytuacja wygląda jeszcze gorzej – różne kwarki i leptony dzielą się na sześć niezwiązanych ze sobą skupisk, które są w najwyższym stopniu nieciekawe: jedno ma wprawdzie sześć elementów, lecz pozostałe są zaledwie szkicami jakichś motywów, zawierają bowiem niewiele elementów – po kolei: 3, 3, 2, 1 oraz 1. Jednak harmonię najbardziej burzą owe dziwne liczby, średnie wartości ładunków

elektrycznych, powiązane z każdym ze skupisk. Sprawiają wrażenie zupełnie przypadkowych.

## Rejestr Ładunków

Na szczęście Rdzeń zawiera zarodki własnego rozwoju. Jego główną zasadą jest symetria, a na tym pojęciu możemy wznosić konstrukcje myślowe, wykorzystując jedynie siłę naszego rozumu. Możemy eksperymentować z równaniami.

Możemy sobie na przykład wyobrazić, że istnieją przekształcenia umożliwiające zamianę ładunków koloru oddziaływania silnego na ładunki oddziaływania słabego i odwrotnie. W ten sposób powstanie większa grupa powiązanych ze sobą cząstek i może dzięki temu pojawią się jakieś interesujące wzorce. Możemy mieć nadzieję, że w najlepszym przypadku owe trzy oddzielne przekształcenia symetryczne $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ są różnymi przejawami jednej większej, nadrzędnej symetrii zawierającej je wszystkie w sobie.

Matematyka symetrii jest dobrze rozwiniętą dziedziną, mamy więc potężne narzędzia nadające się do poszukiwania takich prawidłowości. Możliwości nie jest zbyt wiele, możemy więc sprawdzić je jedna po drugiej.

Moim zdaniem najbardziej obiecująca symetria nadrzędna opiera się na grupie przekształceń znanej jako $SO(10)$. Wszystkie atrakcyjne możliwości są mniejszymi odmianami właśnie tej grupy.

Z matematycznego punktu widzenia $SO(10)$ składa się z obrotów w dziesięciowymiarowej przestrzeni. Pragnę podkreślić, że jest to czysto matematyczna „przestrzeń” – nie taka, w której moglibyśmy się przemieszczać, nawet gdybyśmy byli bardzo mali. W tej dziesięciowymiarowej przestrzeni nadrzędnej symetrii $SO(10)$ obejmującej symetrie $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ Rdzenia – innymi słowy: unifikującej oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne – przebywają wyłącznie pojęcia. Każdemu z ładunków koloru Rdzenia (czerwony, biały, niebieski, zielony i fioletowy) odpowiada w tej przestrzeni dwuwymiarowa płaszczyzna (a zatem mamy w sumie 5 ×

2 = 10 wymiarów). Ponieważ w przestrzeni tej zdefiniowano również obroty przekształcające dowolną płaszczyznę w inną, w *SO*(10) ładunki i symetrie Rdzenia ulegają unifikacji i rozszerzeniu.

Osoby obeznane z matematyką nie dziwią się zapewne temu, że mniejsze symetrie można łączyć w większe. Jak wspomniałem, narzędzia matematyczne pozwalające dokonywać takich operacji są dobrze rozwinięte. Znacznie mniej oczywiste, a zatem dużo bardziej interesujące, jest to, że te rozrzucone skupiska kwarków i leptonów pasują do siebie. To właśnie pokazano na rysunku 17.2. Układ ten nazywam zwykle Rejestrem Ładunków.

W Rejestrze Ładunków wszystkie kwarki i leptony są, jak się wydaje, traktowane tak samo. Każdy z nich można przekształcić w dowolny inny ładunek. Układają się w bardzo szczególny wzór – tak zwaną reprezentację spinorową *SO*(10). Okazuje się, że gdy wykonujemy oddzielne obroty w dwuwymiarowych płaszczyznach odpowiadających ładunkom czerwonym, białym, niebieskim, zielonym i fioletowym, w każdym z tych przypadków połowa cząstek ma dodatni ładunek jednostkowy, a połowa – ujemny. W Rejestrze Ładunków mówią o tym znaki „+" oraz" „–". Każdy możliwy układ symboli + oraz – występuje dokładnie raz, przy dodatkowym ograniczeniu, że całkowita liczba znaków + musi być parzysta.

Ładunki elektryczne, które w Rdzeniu wydają się przypadkowym ozdobnikiem, stają się w tym obrazie istotnym składnikiem harmonii unifikacji. Nie są już niezależne od innych ładunków. Wzór

$$Y = -1/6\,(C + B + N) + 1/4\,(Z + F)$$

wyraża ładunek elektryczny – mówiąc dokładniej, hiperładunek – za pomocą pozostałych ładunków. Zatem przekształcenia związane z obrotem ładunku elektrycznego obracają każdą z pierwszych trzech płaszczyzn o jakiś wspólny kąt, a pozostałe dwie w kierunku przeciwnym o kąt 3/2 razy większy.

By osiągnąć taki stopień unifikacji, musimy uświadomić sobie, że cząstki prawochiralne można uważać za antycząstki ich własnych (lewochiralnych) antycząstek. Na przykład prawochiralny elektron

jest antycząstką lewochiralnego pozytonu. Opisy te od strony fizycznej mają taką samą zawartość, ponieważ zarówno cząstka, jak i jej antycząstka są wzbudzeniami tego samego pola, a to właśnie pole pojawia się w podstawowych równaniach. Przekształcenia symetrii pól wiążą ze sobą wzbudzenia o takiej samej chiralności, aby więc znaleźć wszystkie możliwe symetrie, musimy rozważać wyłącznie lewochiralne wzbudzenia (nawet jeśli to oznacza konieczność zajęcia się antycząstkami).

Gdy przechodzimy od Rejestru Ładunków do Rdzenia, musimy mieć na uwadze, że komplety ładunków koloru wzajemnie się znoszą. Równe ilości ładunku czerwonego, białego i niebieskiego – czy też równe ilości ładunku zielonego i fioletowego – redukują się do zera. I tak na przykład znoszą się trzy równe (+) ładunki koloru: czerwony, biały i niebieski lewochiralnego elektronu *e*. Redukują się również w prawochiralnym elektronie, który w Rejestrze Ładunków występuje jako swoja lewochiralna antycząstka $e^c$. Oba rodzaje elektronów są niewykrywalne dla gluonów ładunku koloru QCD. Innymi słowy, elektrony nie uczestniczą w oddziaływaniu silnym.

Najbardziej osobliwą pozycją w Rejestrze Ładunków jest ostatni wpis: *N*. W tym przypadku redukują się ładunki koloru zarówno oddziaływania silnego, jak i słabego. Oznacza to, że cząstka ta jest niewidzialna dla oddziaływania silnego i słabego. Jej ładunek elektryczny również wynosi zero. Cząstka ta nie ulega zatem wpływowi żadnej z konwencjonalnych sił Rdzenia. Powoduje to, że jest ona beznadziejnie trudna do wykrycia – sytuacja jest jeszcze gorsza niż w przypadku neutrin, które przynajmniej uczestniczą w oddziaływaniu słabym. (Cząstka *N* odczuwa jednak i sama wywiera wpływ grawitacyjny, ale jak już mówiliśmy, grawitacja pojedynczych cząstek jest zbyt mała, by mogła mieć praktyczne znaczenie w doświadczeniach).

Oczywiście cząstki *N* nie udało się wykryć. Jakżeby inaczej? Gdybyśmy ją zaobserwowali, nie mogłaby być cząstką *N*, bo jej z definicji wykryć nie można! Taki „sukces” teorii jest oczywiście pusty. Cząstka *N* jest jednak potrzebna z innego, bardziej

konstruktywnego powodu. Jest nim cząstka $\nu^R$, która po dodaniu do Rdzenia pozwala neutrinom mieć ich niewielką masę[102].

W Rejestrze Ładunków w lewej kolumnie umieszczono nazwy cząstek – kwarków i leptonów – którymi posługujemy się do skonstruowania Rdzenia i świata, chociaż tak naprawdę moglibyśmy usunąć tę kolumnę. Gdybyśmy nie znali nazw tych cząstek i nie wiedzieli nic o ich własnościach, a mielibyśmy jedynie nieopisany Rejestr Ładunków, niczego byśmy nie stracili. Na podstawie informacji zawartej w Rejestrze Ładunków moglibyśmy zrekonstruować własności wszystkich cząstek (a ich nazwy są oczywiście i tak umowne).

Gdyby jednak skupiska Rdzenia miały choć trochę inny kształt lub gdyby owe towarzyszące im dziwne liczby były inne, nie bylibyśmy w stanie utworzyć żadnego łączącego je wzorca.

Rejestr Ładunków odwzorowuje matematyczny ideał na fizyczną rzeczywistość. Jest on w pełni godzien najwyższej pochwały, jaka padła z ust Salieriego: „Usunięcie jednej nuty stanowiłoby ujmę. Przesunięcie jednej frazy zburzyłoby całą strukturę".

## Śpiew syreny

W mitologii syreny są istotami, które na skalistych wybrzeżach śpiewają urzekającą pieśń i zwabiają nią żeglarzy niezważających na niebezpieczeństwo rozbicia okrętu na pobliskich skałach. Ich pieśń niesie z sobą obietnicę poznania tajemnic przeszłości i przyszłości. W ich głosie brzmi zapewnienie: „Wiemy o wszystkich ziemskich dolach i niedolach"[103]. Jane Ellen Harrison zauważa: „To dziwne i piękne, że Homer każe syrenom odwoływać się do ducha, a nie ciała"[104].

Usłyszeliśmy pieśń syreny – opowiada ona o unifikacji.

92 Omawialiśmy już wcześniej bliski związek między niezwykle małymi odległościami a niezmiernie dużymi energiami. Dodatkowe wskazówki i komentarze można również znaleźć w uwagach końcowych.

93 Wyjątki omówimy już wkrótce.

94 Nie chcę przez to powiedzieć, że Rdzeń nie zostanie nigdy zastąpiony czymś nowszym. Mam nadzieję, że do tego dojdzie – niebawem opiszę, jak i dlaczego. Jednak podobnie jak w większości zastosowań wciąż posługujemy się newtonowską teorią mechaniki i grawitacji, tak i Rdzeń ma na swoim koncie tak wiele udokumentowanych sukcesów odniesionych w różnych obszarach, że trudno mi sobie wyobrazić, abyśmy kiedykolwiek chcieli wyrzucić go na śmietnik historii. Powiem to nawet dobitniej: uważam, że Rdzeń tworzy solidny fundament biologii, chemii i astrofizyki, który nigdy nie będzie wymagał żadnej modyfikacji. (No dobrze, „nigdy" to dosyć długo. Powiedzmy, w ciągu najbliższych kilku miliardów lat). Wspomniany w jednej z wcześniejszych uwag Kwantowy Cenzor chroni te dziedziny nauki przed szalonymi zjawiskami zachodzącymi na ultrakrótkich odległościach i w niezwykle wysokich energiach.

95 Książka *Weak Interactions of Leptons and Quarks* Eugene'a Comminsa i Philipa Bucksbauma zawiera obszerną dyskusję na temat zastosowań tej teorii w astrofizyce. Natomiast w książce *Neutrino Astrophysics* John Bahcall niezwykle fachowo opisuje przedstawiane zagadnienia i nic w tym dziwnego, był jednym z niekwestionowanych mistrzów w tej dziedzinie.

96 Przekształceniami jądrowymi dostarczającymi gwiazdom energii są również reakcje syntezy, które nie wymagają zamiany protonów w neutrony. Między innymi jest to proces, w którym trzy cząstki alfa (składające się z dwóch protonów i dwóch neutronów) łączą się w jądro atomu węgla (sześć protonów i sześć neutronów). W reakcjach takich nie uczestniczy oddziaływanie słabe, lecz jedynie oddziaływania silne i elektromagnetyczne. Są one szczególnie ważne w późniejszych fazach ewolucji gwiazd.

97 Na temat neutrin i ich własności napisano już całe książki. (Tak naprawdę one jednak oddziałują – choć bardzo rzadko). Ponieważ temat obfituje w wiele specjalistycznych zagadnień i jest wątkiem pobocznym w naszej opowieści, opis ten zawiera jedynie wybiórcze i bardzo skrótowe informacje. Więcej szczegółów i odsyłaczy do literatury znajdziecie w uwagach w przypisach końcowych.

98 Jak wspomnieliśmy, neutrina są tutaj przypadkiem szczególnym.

99 Lew Tołstoj, Anna Karenina, przeł. Kazimiera Iłłakowiczówna, Świat Książki, Warszawa 2001, s. 6 (przyp. tłum.).

100 Mówiąc ściśle, jak wspomnieliśmy, elektromagnetyzm jest mieszanką fragmentów zarówno SU(2), jak i U(1). Zatem U(1) nie jest do końca elektromagnetyzmem. Ma własną nazwę – hiperładunek. Będę jednak najczęściej używał tej bardziej znanej nazwy, choć z formalnego punktu widzenia nie jest ona całkiem poprawna.

101 Właściwie powinienem mówić o lewochiralnych i prawochiralnych polach.

Cząstka o niezerowej masie porusza się z prędkością mniejszą od prędkości światła i to powoduje pewien problem. Możemy sobie mianowicie wyobrazić, że przyspieszamy tak bardzo, iż wyprzedzamy taką cząstkę. Obserwatorowi poruszającemu się z tak dużą szybkością będzie się wydawało, że porusza się ona do tyłu – to znaczy, w kierunku przeciwnym do tego, w jakim porusza się względem obserwatora znajdującego się w stanie spoczynku. Ponieważ kierunek spinu w obu przypadkach będzie wyglądał tak samo, cząstka, która dla nieruchomego obserwatora jest prawochiralna, zdaniem wspomnianego obserwatora w ruchu będzie lewochiralna. A przecież zgodnie z teorią względności obu obserwatorów muszą obowiązywać takie same prawa. Wniosek: prawa fizyczne nie mogą bezpośrednio zależeć od chiralności cząstek.

Poprawne ujęcie tych faktów jest bardziej subtelne. Mamy dwa oddzielne rodzaje pól kwantowych: jedne tworzą cząstki lewochiralne, drugie – prawochiralne. Równania opisujące te pola są różne. Gdy już jednak jakaś cząstka (dowolnego rodzaju) powstanie, w wyniku oddziaływań z Siatką jej chiralność może się zmienić. W standardowym modelu elektrosłabym taki właśnie efekt mają oddziaływania cząstek z kondensatem Higgsa.

W przypadku cząstek *bezmasowych* (albo pól kwantowych) możemy wprowadzić jednoznaczne (to znaczy, niezależne od prędkości układu) rozróżnienie cząstek lewochiralnych i prawochiralnych. Fakt, że wielokrotnie sprawdzone równania oddziaływań słabych bazują na tym rozróżnieniu, świadczy o tym, iż dla Natury najlepszym podstawowym budulcem są bezmasowe cząstki i pola kwantowe.

102 Więcej na ten temat powiemy później, w rozdziale dwudziestym pierwszym.

103 Homer, Odyseja, przeł. Lucjan Siemieński [w:] Homer, Dzieła, tom II, PIW, Warszawa 1990, s. 186 (przyp. tłum.).

104 Jane Harrison, *The Ker as Siren* [w:] *Prolegomena to the Study of Greek Religion*, wyd. 3, 1922, s. 197. Pisząc ten fragment, miałem nadzieję, że na okładce książki znajdzie się reprodukcja obrazu *Syrena* Johna Williama Waterhouse'a. Niestety, los chciał inaczej. Możecie jednak obejrzeć to dzieło na rycinie nr 7 kolorowej wkładki.

# Rozdział 18

# Unifikacja: niewyraźny obraz po drugiej stronie szyby

*Wyższa symetria unifikująca podstawowe cząstki przewiduje także równość wszystkich fundamentalnych oddziaływań. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że przewidywanie to jest błędne. Gdy jednak weźmiemy poprawkę na zniekształcenie powodowane przez fluktuacje Siatki, okazuje się ono dosyć prawdopodobne.*

Usłyszeliśmy pieśń syreny – opowiada ona o unifikacji. Czas już, byśmy otworzyli oczy i postarali się bezpiecznie przeprowadzić okręt w pobliżu skalistego wybrzeża, z którego dobiega do nas ta pieśń.

## To nie symetria

Rozszerzona symetria unifikacji dokonuje wspaniałych rzeczy. Składa rozrzucone fragmenty Rdzenia w proporcjonalnie zbudowane całości. Gdy minie nam już jednak zaślepienie wywołane pierwszym wrażeniem i przyjrzymy się wszystkiemu uważniej, zauważymy, że sprawy nie wyglądają wcale aż tak dobrze.

Można wręcz odnieść wrażenie, że coś się nie zgadza w podstawowych kwestiach. Jeżeli oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne są przejawami wspólnej, leżącej u ich podstaw

głównej siły, to zgodnie z prawami symetrii powinny one wszystkie mieć taką samą siłę – a tak nie jest. Pokazuje to rysunek 18.1.

Rysunek 18.1. Doskonała symetria pociągałaby za sobą taką samą siłę oddziaływań silnego, słabego i elektromagnetycznego – a tak nie jest. Na rysunku przyjęto, że ilościową miarą względnej siły oddziaływań[105] jest odwrotność kwadratu sprzężenia – taka miara przyda nam się w dalszej części książki. Oddziaływanie silne, które jest najmocniejsze, znajduje się zatem na dole.

Nie bez kozery to oddziaływanie silne, a nie elektromagnetyczne, nazywa się „silnym". Jest ono naprawdę silniejsze. Jednym z przejawów tej różnicy jest fakt, że jądra atomowe, powstające pod wpływem oddziaływania silnego, są znacznie mniejsze od atomów[106], które z kolei łączy w całość oddziaływanie elektromagnetyczne. Za sprawą oddziaływania silnego jądra są dużo bardziej zwarte.

Matematyka teorii opisującej Rdzeń pozwala nam podać dokładne wartości liczbowe względnych sił różnych oddziaływań. Z każdym z nich – z silnym, słabym, elektromagnetycznym – związana jest wielkość, którą nazywamy stałą sprzężenia albo w skrócie po prostu sprzężeniem.

W przypadku diagramów Feynmana sprzężenie jest czynnikiem, przez który należy pomnożyć każdy z łączników. (Te powszechne, ogólne czynniki sprzężenia występują dodatkowo, niezależnie od czysto liczbowych wartości ładunków koloru lub

elektromagnetycznych poszczególnych cząstek, które pokazano w Rejestrze Ładunków). Za każdym więc razem, gdy w łączniku pojawia się gluon ładunku koloru, mnożymy wkład przedstawionego procesu przez sprzężenie oddziaływania silnego; za każdym razem, gdy pojawia się foton, wykonujemy mnożenie przez wartość sprzężenia oddziaływania elektromagnetycznego. Podstawowa siła elektromagnetyczna powstaje w wyniku wymiany fotonu (rysunek 7.4), a zatem w jej wzorze występuje kwadrat sprzężenia elektromagnetycznego. Podobnie podstawowe oddziaływanie silne powstaje w wyniku wymiany gluonu i dlatego w jego wzorze pojawia się kwadrat sprzężenia silnego.

Pełna symetria oddziaływań wymaga, żeby wszystkie łączniki były ze sobą powiązane. W takim obrazie nie ma miejsca na różnice w sprzężeniach. Obserwowane zróżnicowanie stanowi zatem poważne wyzwanie dla całej idei osiągnięcia unifikacji poprzez symetrię.

## Patrzymy uważniej

Wspaniałą nauką, jaką możemy wyciągnąć z analizy Rdzenia, jest fakt, że byt, który postrzegamy jako pustą przestrzeń, stanowi w rzeczywistości dynamiczny ośrodek obdarzony strukturą i kipiący od aktywności. Siatka – jak nazwaliśmy ten ośrodek – wpływa na własności wszystkiego, co się w niej znajduje – czyli dosłownie: wszystkiego. Widzimy rzeczy nie takie, jakie są, ale jak gdybyśmy patrzyli na nie przez szybę – są dla nas niewyraźne. W szczególności Siatka pełna jest wirtualnych cząstek, które mogą ekranować lub antyekranować schowane za ich chmurą źródło oddziaływania. W przypadku oddziaływania silnego zjawisko to miało kluczowe znaczenie dla opowieści, którą snuliśmy w części I i II. Okazuje się, że podobnie jest i w przypadku pozostałych oddziaływań.

Obserwowane przez nas wartości sprzężenia zależą więc od tego, jak patrzymy. Jeśli spojrzymy niedbale, nie dostrzeżemy podstawowych źródeł oddziaływania, ale jedynie ich obraz

zniekształcony przez Siatkę. Innymi słowy, zobaczymy podstawowe źródła oddziaływań wymieszane w jedną całość z otaczającym je obłokiem wirtualnych cząstek, bez możliwości przyjrzenia się szczegółom. Aby ocenić, czy mamy do czynienia z doskonałą symetrią i jednością sił, powinniśmy uwzględnić te zniekształcenia i odpowiednio je skorygować.

Niewykluczone, że będziemy musieli zajrzeć na bardzo małe odległości i w bardzo krótkie czasy, by dotrzeć wzrokiem do samych podstaw. To często powtarzająca się historia – od van Leeuwenhoeka i jego mikroskopów, poprzez Friedmana, Kendalla i Taylora obserwujących wnętrze protonów za pomocą ultrastroboskopowego nanomikroskopu w SLAC, aż po fizyków doświadczalnych posługujących się akceleratorem LEP do wywoływania twórczej destrukcji w celu zajrzenia głębiej w Siatkę. Przy okazji omawiania dwóch ostatnich projektów dowiedzieliśmy się, że obserwacja niezwykle małych odległości i czasów, w których do głosu dochodzi teoria kwantowa, wymaga użycia urządzeń aktywnie przenoszących na badane obiekty olbrzymie ilości pędu i energii. Dlatego właśnie decydujemy się na korzystanie z akceleratorów o dużych energiach, nie bacząc na ich złożoność i wysoki koszt budowy.

## Niewiele brakowało

W rozdziale szesnastym mówiliśmy, że obłoki cząstek wirtualnych mogą się formować powoli. Aby obłok wokół kwarka urósł od zarodka rozsądnej wielkości do rozmiarów stanowiących zagrożenie, musi rozwinąć się od długości Plancka do rozmiaru protonu: odległości te różnią się o czynnik $10^{18}$!

Biorąc pod uwagę zdobyte doświadczenie, nie powinno nas dziwić, że dotarcie do podstaw – zajrzenie na odległości, na których może dochodzić do unifikacji – może wymagać użycia astronomicznych ilości pędu i energii. Najnowszy wielki akcelerator, LHC, pozwoli na dokonanie obserwacji z dziesięciokrotnie większą rozdzielczością –

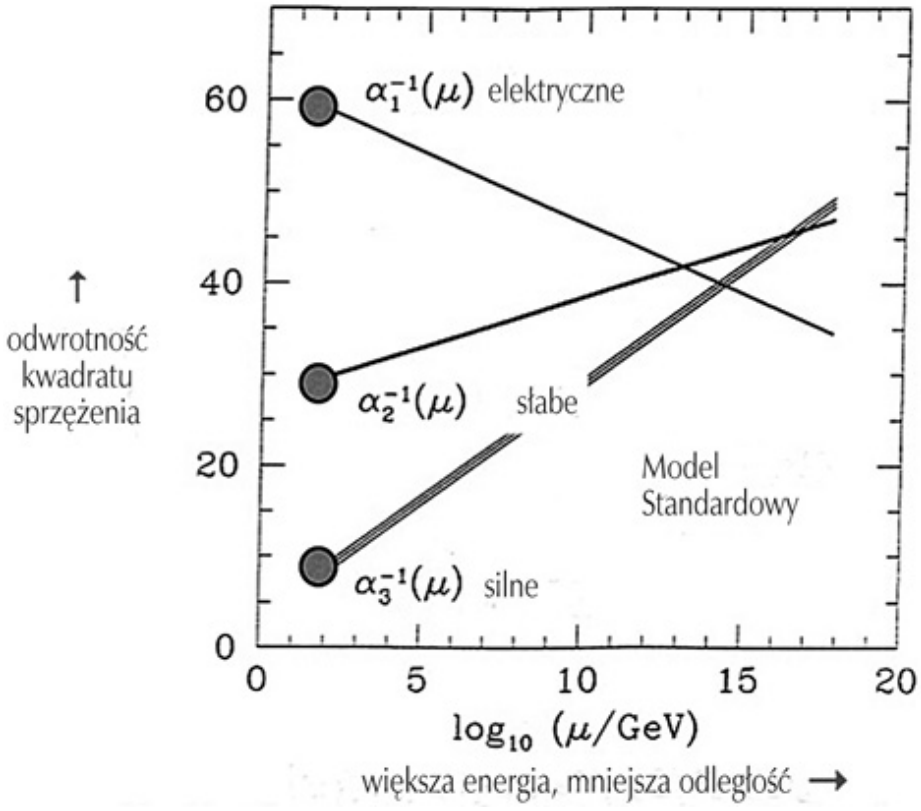
czyli lepszą o czynnik $10^1$ – przy koszcie około *dziesięciu miliardów* euro. Dalsze zwiększanie rozdzielczości jest już naprawdę trudne.

Zamiast tego pozostaje nam więc polegać na własnym rozumie. Chociaż podejście takie nie gwarantuje, że unikniemy błędów, jest jednak dosyć tanie i znajduje się (że tak powiem) w zasięgu ręki. Za pomocą kilku pociągnięć pióra możemy wyliczyć, jaki wpływ ma zniekształcenie powodowane przez Siatkę, i odpowiednio skorygować obserwacje.

Efekt takiego podejścia przedstawiono na rysunku 18.2.

No i? A niech to! Tak niewiele brakowało. Jesteśmy blisko, ale na szampana jeszcze za wcześnie.

Co robić?




Rysunek 18.2. Bierzemy poprawkę na zniekształcenie powodowane przez Siatkę, aby się przekonać, czy zachodzi unifikacja sił. Jeżeli w ten sposób przygotujemy wykres – na którym w kierunku pionowym rośnie wartość odwrotności kwadratu sprzężenia, a na osi poziomej odmierza się logarytm

energii lub (co równoważne) odwrotności odległości – to skorygowane sprzężenia, obserwowane z coraz większą rozdzielczością, wykreślają linie proste. Szerokość linii pokazuje, jaki jest rozmiar błędów doświadczalnych. Prawie się udało, ale nie do końca.

105 Zauważmy, że na poziomie podstawowym – w przypadku liczb, przez które mnoży się wierzchołki na diagramach Feynmana – sprzężenie oddziaływania słabego jest tak naprawdę silniejsze od sprzężenia elektromagnetycznego (dla znawców tematu: rozumianego tutaj jako hiperładunek). Jednak nadprzewodnictwo Siatki powoduje, że oddziaływanie słabe ma krótki zasięg, zatem w praktyce jego wpływ jest zwykle znacznie mniejszy.

106 Różnica między rozmiarem atomu a wielkością jego jądra jedynie częściowo wynika z względnej słabości oddziaływań elektromagnetycznych. Ważnym czynnikiem jest tutaj również fakt, że masa elektronu jest niewielka w porównaniu z masami protonów i neutronów. Zrozumiemy dlaczego, jeżeli odwołamy się do rozumowania przytoczonego w punkcie 3 *scholium* zamykającego rozdział dziesiąty. Rozmiar atomów jest wynikiem kompromisu między dążeniem do zrównoważenia pól elektrycznych przez umieszczenie elektronów wprost na protonach a uwzględnieniem falowej natury elektronów. Im mniejsza jest masa danej cząstki, tym bardziej jej funkcja falowa się rozszerza i dlatego mała masa elektronu przechyla szalę kompromisu w kierunku większych rozmiarów.

# Rozdział 19

# Prawdyfikacja

*Gdy jakąś atrakcyjną ideę niewiele dzieli od prawdy, staramy się znaleźć jakieś sposoby, by stała się prawdziwa. Próbujemy ją prawdyfikować.*

Słynny filozof Karl Popper[107] podkreślał, jak ważna w nauce jest falsyfikacja. Według Poppera cechą szczególną teorii naukowych jest to, że wysuwają one stwierdzenia – przewidywania – które mogą okazać się fałszywe. Czy to stwierdzenie Poppera jest prawdziwe? A czy potraficie dowieść jego fałszywości?

Może to głęboka prawda. Reppopizm – przeciwieństwo popperyzmu – głosi, że cechą szczególną dobrej teorii naukowej jest możliwość jej prawdyfikacji. Prawdyfikowalna teoria może się mylić, ale jeśli jest to dobra teoria, na jej błędach można dalej budować.

Pod pewnym istotnym względem falsyfikacja i prawdyfikacja to dwie strony tej samej monety. W obu przypadkach w cenie jest precyzja sformułowań. W jednym i drugim wypadku najgorszą teorią wcale nie jest taka, która popełnia błędy. Na błędach można się przecież uczyć. Najgorsza teoria to taka, która nawet nie usiłuje być w błędzie – gotowa z takim samym prawdopodobieństwem przewidzieć cokolwiek. Gdy wszystko jest tak samo możliwe, nic nie wzbudza naszego szczególnego zainteresowania.

Posługując się słownictwem reguły jezuitów – „lepiej prosić o przebaczenie, niż pytać o pozwolenie” – powiedzielibyśmy, że teoria falsyfikowalna pyta o pozwolenie, a prawdyfikowalna prosi

o przebaczenie – natomiast teoria nienaukowa w ogóle nie wie, co to grzech.

Idee rozpoznawania obrazów i kompresji opisu, które omawialiśmy wcześniej, pozwalają nam spojrzeć na te kwestie z innej perspektywy (i, moim zdaniem, zajrzeć głębiej). Jeśli po przetworzeniu danych zebranych z cyfrowej matrycy aparatu każdy piksel będzie miał średni odcień szarości, nie wyłoni się z tego żaden obraz. Podobnie, abyśmy w danych docierających do nas z rzeczywistego świata mogli rozpoznać jakieś wzorce na tle tego wszystkiego, co sobie można wyobrazić, propozycje wysuwane przez teorię muszą odróżniać rzeczy możliwe od niemożliwych (zgodnie z daną teorią). Tylko w takim przypadku możemy je inaczej pokolorować i uzyskać w wyniku obserwacji obraz, nad którym można dalej pracować – obraz o odpowiednim kontraście.

Jeżeli rozróżnienie to będzie precyzyjne i zdołamy prawidłowo zidentyfikować wiele pikseli, uzyskamy użyteczny obraz, nawet jeśli popełnimy przy tym również kilka błędów. (Można go przecież wyretuszować w Photoshopie). Dlatego opłaca się mieć ambicję – to znaczy, wypełniać obraz dużą liczbą pikseli (czy też, w naszej przenośni, dużą liczbą faktów do rozważenia) – a także zachować precyzję.

Dość już przenośni i ogólników! Czas zająć się analizą konkretnego przypadku prawdyfikacji.

## Podnosimy stawkę: jeszcze więcej unifikacji

Nasza ambitna próba zunifikowania oddziaływania silnego, elektromagnetycznego i słabego nie zakończyła się całkowitym sukcesem. Udało nam się skonstruować teorię, która była nie tylko falsyfikowalna, ale wręcz fałszywa. To bardzo naukowe – powiada Karl Popper. A jednak z jakiegoś powodu nie przepełnia nas uczucie spełnienia.

Gdy taka atrakcyjna i niemal działająca idea nie do końca się sprawdza, pospieszenie jej na ratunek jest całkowicie sensownym

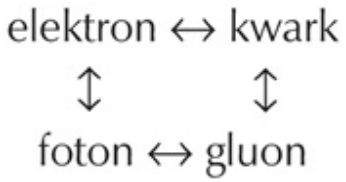
posunięciem. Należy poszukać sposobów na jej prawdyfikację.

Może w naszym dążeniu do unifikacji nie byliśmy dość ambitni? Sednem naszej unifikacji różnych ładunków jest taki obraz:

elektron ↔ kwark

foton ↔ gluon

Mimo wszystko podstawowe składniki świata są w nim wciąż podzielone na dwie oddzielne klasy. Czy można się posunąć dalej? Czy moglibyśmy uzyskać *coś takiego*:




Spróbujmy.

107 Więcej na temat Poppera i jego filozofii można się dowiedzieć z dwutomowego dzieła *The Philosophy of Karl Popper* przygotowanego pod redakcją Paula Schilppa.

# Rozdział 20

# Unifikacja ♥ SUSY

*Rozszerzając równania fizyki o supersymetrię, wzbogacamy Siatkę. Musimy zatem skorygować obliczenia pokazujące, jak Siatka zniekształca obraz unifikacji. Po dokonaniu tych poprawek naszym oczom ukaże się wyraźny obraz unifikacji.*

Udoskonalając równania, powiększamy świat.

W latach sześćdziesiątych XIX wieku James Clerk Maxwell zestawił równania elektryczności i magnetyzmu w postaci, w jakiej je wówczas rozumiano, i odkrył, że prowadzą do sprzeczności[108]. Doszedł do wniosku, że można przywrócić im spójność, jeśli doda się nowy wyraz. Oczywiście ów nowy wyraz odpowiada nowemu zjawisku fizycznemu. Kilka lat wcześniej Michael Faraday (w Anglii) i Joseph Henry (w Stanach Zjednoczonych) odkryli, że zmieniające się w czasie pola magnetyczne powodują powstanie pól elektrycznych. Nowy wyraz Maxwella wiązał się z przeciwnym efektem, z tym że zmieniające się w czasie pola elektryczne powodują powstanie pól magnetycznych. Łącząc ze sobą te dwa zjawiska, uzyskujemy niezwykłą nową możliwość: zmienne pola elektryczne wywołują zmienne pola magnetyczne, które powodują powstanie zmiennych pól elektrycznych, które wytwarzają zmienne pola magnetyczne… Można uzyskać samonapędzające się zaburzenie, które żyje własnym życiem. Maxwell przekonał się, że z jego równań wynikają tego rodzaju rozwiązania. Mógł

wyznaczyć prędkość, z jaką takie zaburzenia powinny przemieszczać się w przestrzeni, i odkrył, że poruszają się one z prędkością światła.

Ponieważ Maxwell był bardzo bystrym facetem, od razu doszedł do wniosku, że te zaburzenia elektromagnetyczne *są* światłem. Idea ta, obowiązująca do dzisiaj, znalazła wiele użytecznych zastosowań. W dalszym ciągu jest podstawą naszego najlepszego rozumienia natury światła. To jednak jeszcze nie wszystko. Równania Maxwella mają również rozwiązania z długościami fal mniejszymi i większymi od światła widzialnego. Przewidziały więc one istnienie nowych zjawisk – można by nawet powiedzieć, nowych rodzajów materii – w tamtych czasach nieznanych. Obecnie nazywamy je falami radiowymi, mikrofalami, promieniowaniem podczerwonym, ultrafioletowym, promieniami rentgenowskimi i gamma – wszystkie one przyczyniły się do poprawy naszego życia, wszystkie są imigrantami ze świata pojęć przybyłymi do świata fizycznego.

Pod koniec lat dwudziestych XX wieku Paul Dirac usiłował poprawić równania mechaniki kwantowej opisujące elektrony. Kilka lat wcześniej Erwin Schrödinger sformułował równanie elektronu, które świetnie się sprawdzało w wielu zastosowaniach. Fizycy teoretycy nie byli jednak do końca z niego zadowoleni, ponieważ nie było ono zgodne ze szczególną teorią względności. Równanie to jest kwantowomechaniczną wersją newtonowskiej zasady dynamiki; działa zgodnie ze starą teorią względności mechaniki, a nie z elektromagnetyczną, einsteinowską teorią względności. Dirac odkrył, że może pogodzić to równanie ze szczególną teorią względności, jeśli posłuży się ujęciem szerszym niż Schrödinger. Podobnie jak po udoskonaleniu przez Maxwella równań opisujących elektryczność i magnetyzm, tak po poprawieniu równania elektronu pojawiły się nowe typy rozwiązań. Oprócz rozwiązań odpowiadających elektronom poruszającym się z różnymi prędkościami i obracającym w różnych kierunkach pojawiły się też i inne wyniki. Po pokonaniu różnych przeciwności i kilku falstartach w 1931 roku Dirac z pomocą Hermanna Weyla odszyfrował znaczenie tych dziwnych nowych rozwiązań. Odpowiadały one nowemu rodzajowi cząstki o takiej samej masie jak elektron, ale o przeciwnym ładunku. Już wkrótce, w 1932 roku, właśnie taką

cząstkę odkrył Carl Anderson. Nazywamy ją antyelektronem lub pozytonem. Obecnie cząstki te umożliwiają nam obserwowanie aktywności mózgu (za pomocą badania PET, znanego również jako pozytonowa tomografia emisyjna).

Można podać jeszcze wiele innych nowszych przykładów tego, jak nowe postacie materii pojawiły się najpierw w równaniach, a dopiero potem wykryto je w laboratoriach. Prawdę mówiąc, sytuacja taka stała się wręcz regułą. Kwarki (zarówno jako pojęcie ogólne, jak i konkretne cząstki o zapachu *c*, *b* oraz *t*), gluony ładunku koloru, wuony i zetony oraz trzy rodzaje neutrin – wszystkie te cząstki ujrzeliśmy po raz pierwszy jako rozwiązania odpowiednich równań, a dopiero później mogliśmy je podziwiać w ich fizycznej postaci.

W dalszym ciągu trwają poszukiwania utalentowanych mieszkańców świata pojęć, których chcielibyśmy sprowadzić do świata fizycznego – przede wszystkim chodzi o cząstki Higgsa[109] i aksjony. Serce mi się kraje, że nie mogę ich w tym miejscu szczegółowo opisać, ale wiązałoby się to z koniecznością wprowadzenia dwóch obszernych dygresji, a my przecież zbliżamy się już do punktu kulminacyjnego naszej opowieści. W słowniku i uwagach końcowych znajdziecie więcej informacji na ich temat i odsyłacze do literatury; cząstkę Higgsa przybliżam również w dodatku B.

Dla nas najważniejszym proponowanym rozszerzeniem równań fizycznych jest supersymetria[110], często nazywana pieszczotliwie SUSY. Jak sugeruje jej nazwa, supersymetria wiąże się z wykorzystaniem równań o większej symetrii.

Nowa symetria SUSY ma pewien związek z symetrią „pchnięcia” szczególnej teorii względności. Jak być może pamiętacie, symetria „pchnięcia” mówi, że podstawowe równania nie zmieniają się, gdy do wszystkich składników opisywanego układu doda się jednakową, stałą prędkość. (Dirac musiał zmodyfikować równanie Schrödingera, by mogło ono mieć tę własność). Podobnie supersymetria twierdzi, że równania nie zmienią się, gdy do wszystkich elementów opisywanego układu doda się jednakowy ruch. Chodzi tu jednak o zupełnie inny ruch niż w przypadku symetrii „pchnięcia”. Zamiast

ruchu ze stałą prędkością w zwyczajnej przestrzeni supersymetria mówi o ruchu w nowych wymiarach!

Zanim dacie się ponieść wizjom światów duchowych i tuneli hiperprzestrzennych, pozwólcie, że szybko dodam, iż te nowe wymiary mają zupełnie odmienny charakter od znanych nam wymiarów przestrzeni i czasu. Są to wymiary *kwantowe*. Gdy ciało porusza się w kwantowych wymiarach, nie zmienia swojego położenia – w nich nie ma pojęcia odległości – zmianie ulega jego spin. „Superpchnięcie" zmienia cząstki o określonej ilości właściwego im spinu w cząstki o innej wartości spinu. Ponieważ operacja taka ma nie zmieniać równań, supersymetria łączy ze sobą własności cząstek o różnych spinach. Dzięki SUSY możemy je postrzegać jako te same cząstki, które jedynie różnie poruszają się w kwantowych wymiarach superprzestrzeni.

Wymiary kwantowe można sobie wyobrazić jako nowe warstwy Siatki. Gdy cząstka wskakuje na te nowe poziomy, zmienia się jej spin, a także masa. Jej ładunki – elektryczny, koloru i oddziaływania słabego – pozostają takie same.

Dzięki SUSY być może uda nam się dokończyć dzieło unifikacji Rdzenia. Unifikacja różnych ładunków z wykorzystaniem symetrii *SO*(10) połączyła wszystkie bozony cechowania w jedną wspólną grupę, a wszystkie kwarki i leptony w drugie skupisko. Żadna zwyczajna symetria nie pozwoli jednak na połączenie ze sobą obu tych grup, ponieważ opisują one cząstki o różnych spinach. W tej chwili najlepszą ideą umożliwiającą dokonanie tego jest supersymetria[111].

## Poprawki do poprawek

Okazuje się, że po rozszerzeniu równań fizyki, tak by obejmowały supersymetrię, pojawiają się nowe rozwiązania. Tak jak w przypadku równań Maxwella i Diraca, tym nowym rozwiązaniom odpowiadają nowe formy materii – nowe typy pól i, jako ich wzbudzenia, nowe rodzaje cząstek.

Mówiąc w przybliżeniu, supersymetria wymaga, byśmy *podwoili* liczbę pól w równaniach. Każdemu znanemu nam polu w kwantowych wymiarach towarzyszy nowe pole opisujące aktywność zachodzącą w nowych warstwach Siatki. Cząstki związane z tymi nowymi polami mają takie same ładunki (wszystkich rodzajów) jak ich znane nam odpowiedniki, ale inne masy i spiny.

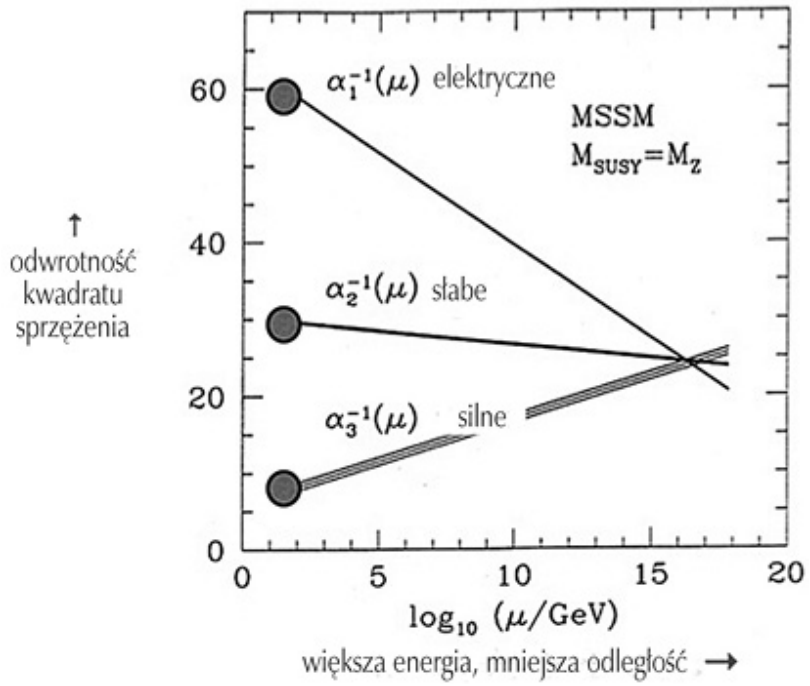
Wyciągnięcie wniosku o istnieniu dwukrotnie większej liczby cząstek na podstawie rozważań estetycznych[112] może wydawać się nieco pochopne i ekstrawaganckie. Może i tak jest, lecz wprowadzenie przez Diraca antymaterii wiązało się z podobnym podwojeniem, a dokonane przez Maxwella rozszerzenie pojęć związanych ze światłem z obszaru światła widzialnego na nieskończony zakres widma elektromagnetycznego miało jeszcze większą skalę. W obydwu przypadkach, w chwili swego opracowania, teorie te były w zasadzie ryzykownym zagraniem opartym na względach estetycznych. Fizycy przekonali się więc, że odwaga popłaca. Lepiej prosić o przebaczenie, niż pytać o pozwolenie. Takoż zakończmy kajanie się; pora przejść do sedna.

Owe nowe cząstki muszą być cięższe od wykrytych już krewniaków, gdyby bowiem tak nie było, już dawno byśmy je zaobserwowali. Przyjmijmy jednak, że ich ciężar nie jest *dużo* większy[113], i zobaczmy, dokąd nas to zaprowadzi[114].

Fluktuacje tych nowych pól obejmują całą Siatkę. Są one nowymi rodzajami cząstek wirtualnych, biorącymi udział w ekranowaniu i antyekranowaniu źródeł oddziaływania silnego, słabego i elektromagnetycznego. By sięgnąć wzrokiem do samych podstaw – na małych odległościach lub w wysokich energiach – musimy poprawić obraz, usuwając zniekształcenia powodowane przez ten pęcherzykowaty ośrodek. Już raz próbowaliśmy dokonać takich poprawek w rozdziale osiemnastym, nie braliśmy jednak wówczas pod uwagę tych możliwych nowych źródeł zniekształceń. Musimy więc wprowadzić poprawki do poprawek[115].

Na rysunku 20.1 pokazano wynik. Gdy mamy ze sobą SUSY, wszystko działa.

# Unifikacja ♥ SUSY




Rysunek 20.1. Supersymetria wymaga rozszerzenia równań fizycznych o nowe pola. Wynikające z istnienia tych nowych pól fluktuacje Siatki zniekształcają obraz najbardziej podstawowych, fundamentalnych procesów fizycznych. Po uwzględnieniu tych zniekształceń i wprowadzeniu odpowiednich poprawek okazuje się, że na krótkich odległościach lub, co równoważne, w dużych energiach zachodzi dokładna unifikacja.

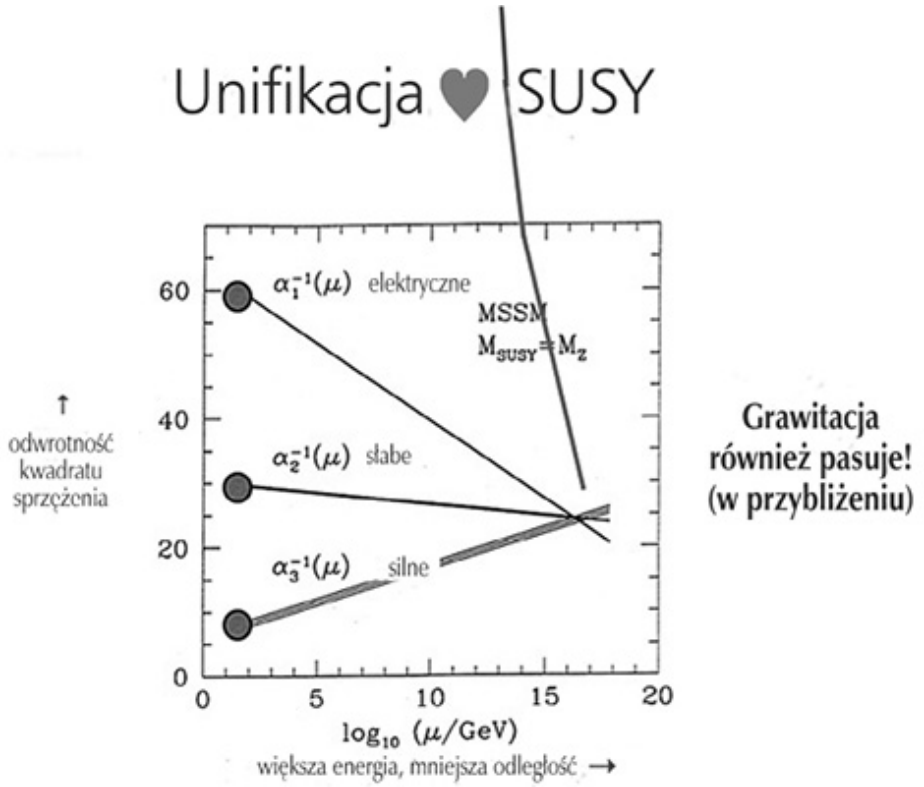
## I grawitacja też

Możemy uwzględnić w naszych rozważaniach również grawitację. Jak się przekonaliśmy, jest ona początkowo *śmiesznie* słaba w porównaniu z innymi siłami. Jeśli spojrzymy na rysunek 20.1, zauważymy, że po lewej stronie, gdzie znajdują się odległości i energie, które możemy zmierzyć w praktyce, oddziaływania silne i elektromagnetyczne różnią się między sobą mniej więcej o czynnik

10. Razem z oddziaływaniem słabym bez trudu mieszczą się więc na eleganckim, porządnie wyglądającym wykresie. Grawitacja nawet w przybliżeniu się na nim nie mieści. Ponieważ jest słabsza, a na wykresie zaznaczamy odwrotność siły oddziaływania, grawitacja powinna się na nim pojawić ponad pozostałymi oddziaływaniami. Aby jednak zaznaczyć ją w skali przyjętej na rysunku, nasz wykres musiałby sięgać daleko poza granice znanego Wszechświata!

Chociaż z drugiej jednak strony…

W przypadku sił Rdzenia – oddziaływań silnego, słabego i elektromagnetycznego – poprawki w miarę przesuwania się na prawo, w kierunku mniejszych odległości i większych energii, są dosyć umiarkowane (pamiętajmy, że każda jednostka na osi poziomej oznacza zmianę o czynnik 10). W końcu wynikają one z subtelnego efektu kwantowomechanicznego: ekranowania (lub antyekranowania) spowodowanego fluktuacjami Siatki. Gdy popatrzymy na grawitację na *bardzo* małych odległościach, wydatkując *bardzo* duże ilości energii, dojdzie do bardziej radykalnej zmiany. Jak mówiliśmy w rozdziale trzecim, grawitacja reaguje bezpośrednio na energię. Jej siła, zgodnie z podaną definicją, jest proporcjonalna do kwadratu energii. Uwzględniając ten efekt, możemy wyliczyć siłę oddziaływania grawitacyjnego na małych odległościach i porównać ją z pozostałymi oddziaływaniami. Wynik porównania pokazano na rysunku 20.2. Z punktu położonego gdzieś daleko poza znanym nam Wszechświatem odwrotność siły oddziaływania grawitacyjnego obniża się i dołącza do pozostałych oddziaływań – spotykają się wszystkie razem całkiem blisko siebie.




Rysunek 20.2. Grawitacja jest początkowo śmiesznie słaba, jednak na małych odległościach jej siła zbliża się do sił pozostałych oddziaływań; wszystkie siły zbiegają się w jednym miejscu, całkiem blisko siebie[116].

[108] Wspomnieliśmy już o tym w rozdziale ósmym.

[109] Więcej informacji na temat cząstek Higgsa znajdziecie we wspomnianych wcześniej popularnonaukowych książkach Oertera i Close'a, natomiast bardziej naukowe omówienie tematu zamieszczono w książce Peskina i Schroedera oraz w podręczniku Srednickiego.

[110] Jeśli chcecie poznać tę tematykę, polecam książkę *Supersymetria: supersymetryczne cząstki i odkrywanie podstawowych praw przyrody* napisaną przez Gordona Kane'a, jednego z wybitnych uczonych zajmujących się tą dziedziną.

[111] Supersymetria nie łączy ze sobą bezpośrednio różnych części Rdzenia. Żadna ze znanych obecnie cząstek nie ma odpowiednich własności, by być supersymetryczną partnerką jakiejś innej cząstki. Połączyć wszystko ze sobą

można jedynie wtedy, gdy jednocześnie uwzględnia się unifikację ładunku i supersymetrię.

112 Popartych niezwykłym sukcesem obliczeniowym – szczegóły wkrótce.

113 Supersymetria musi być złamana, jednak jeśli chodzi o sposób, w jaki do tego dochodzi, mamy więcej niejasności niż w przypadku związanej z tym kwestii kosmicznego nadprzewodnictwa, omawianej w rozdziale ósmym i w dodatku B. Bez względu na to, jak do owego złamania supersymetrii dochodzi, wynik końcowy musi być taki, że supersymetryczne partnerki znanych nam cząstek są znacznie cięższe. Jeżeli jednak będą zbyt ciężkie, nie wniosą wystarczającego wkładu do fluktuacji Siatki i powrócimy do omówionej w rozdziale osiemnastym sytuacji bliskiego, ale niedokładnego, spotkania się sił oddziaływań.

Są również inne, niezależne przesłanki pozwalające przypuszczać, że masy cząstek supersymetrycznych nie są zbyt wielkie. Najważniejsza z nich brzmi następująco:

Jeżeli w ramach zunifikowanej teorii obliczymy, jaki wpływ mają cząstki wirtualne na masę cząstki Higgsa, okaże się, że powodują one zwiększenie tej masy aż do skali unifikacji. Na tym polega tak zwany problem hierarchii. Można zniwelować ten efekt jednym pociągnięciem pióra, przyjmując, że masa początkowa jest taka, by dochodziło do niemal doskonałego zrównoważenia wkładu cząstek wirtualnych, jednak zdaniem większości fizyków takie „dopasowywanie" jest nie do przyjęcia – nazywają je *nienaturalnym*. Po wprowadzeniu supersymetrii owe wpływy równoważą się i nie są już konieczne tak radykalne działania. Jeżeli jednak złamanie supersymetrii następuje w niepomyślny sposób – to znaczy, jeśli cząstki supersymetryczne są zbyt ciężkie – wpadamy z deszczu pod rynnę.

114 Więcej informacji na temat aspektów ilościowych znajdziecie w kolejnym rozdziale i w uwagach końcowych.

115 W tych obliczeniach uwzględniam jedynie wpływ cząstek koniecznych do wprowadzenia supersymetrii. (Uwaga dla znawców tematu: poruszam się w ramach minimalnego supersymetrycznego modelu standardowego, w skrócie MSSM, od ang. *miminal supersymmetric standard model*). Nie biorę pod uwagę dodatkowych (znacznie cięższych) cząstek potrzebnych do stworzenia pełnej teorii zunifikowanej. Dlatego właśnie sprzężenia po zunifikowaniu w wysokiej energii ponownie się rozbiegają. W pełnej teorii, gdy już raz się zbiegną, pozostają ze sobą połączone. Ponieważ jednak nie wiemy wystarczająco dużo, by ustalić, jakie są odpowiednie szczegóły pełnej teorii, postanowiłem pokazać tę kwestię tak, jak w tej chwili wygląda.

116 Jako że nie mamy wiarygodnej teorii dotyczącej zachowania się grawitacji na małych odległościach, przebieg linii oddziaływania grawitacyjnego naszkicowałem jedynie w przybliżeniu.

# Rozdział 21

# U progu nowego złotego wieku

*Przedstawiliśmy nasze argumenty za unifikacją. Teraz Natura musi wydać ostateczny wyrok. Spodziewamy się, że uda nam się poznać jej werdykt za pomocą akceleratorów lub obserwacji prowadzonych w kosmosie i głęboko pod ziemią.*

Przekonaliśmy się, że oparte głęboko na symetrii teorie oddziaływań Rdzenia można ze sobą połączyć. Trzy oddzielne symetrie Rdzenia można przekształcić w części jednej, wszechobejmującej symetrii. Co więcej, ta szeroka symetria wprowadza jedność i spójność w skupiska cząstek Rdzenia. Ze zbieraniny sześciu grup tworzymy doskonały Rejestr Ładunków. Odkrywamy również, że po wprowadzeniu poprawek uwzględniających zniekształcenia powodowane przez fluktuacje Siatki – i dalszym rozszerzeniu symetrii do rozmiaru supersymetrii – okazuje się, iż różne siły oddziaływań Rdzenia wywodzą się z jednej wspólnej wartości, jaką wszystkie przyjmują na małych odległościach. Nawet grawitacja, owa beznadziejnie słaba dziwaczka, dołącza do grona pozostałych sił.

Aby uzyskać tak jasną i wzniosłą perspektywę, pełni nadziei poszerzaliśmy wyobraźnię. Założyliśmy, że Siatka – ów byt, który na co dzień jest dla nas pustą przestrzenią – stanowi wielowarstwowy, różnokolorowy nadprzewodnik. Przyjęliśmy, że świat zawiera dodatkowe wymiary kwantowe potrzebne do wprowadzenia supersymetrii. I śmiało zastosowaliśmy prawa fizyki, podbudowane tymi dwoma potężnymi założeniami,

do olbrzymich energii i niewiarygodnie małych odległości, daleko przekraczających wartości, przy których mieliśmy okazję sprawdzić je bezpośrednio.

Patrząc na sukces intelektualny, jaki udało nam się odnieść – jasność i spójność tej wizji unifikacji – trudno się oprzeć pokusie uwierzenia, iż nasze założenia odpowiadają rzeczywistości. Jednak w nauce to Matka Natura jest ostatecznym sędzią.

Gdy ekspedycja z 1919 roku potwierdziła przewidywane przez Einsteina zjawisko zakrzywienia światła w pobliżu Słońca, pewien dziennikarz zapytał go, co by się stało, gdyby wynik pomiarów był jednak inny. Einstein odparł: „Wtedy Bóg przegapiłby świetną okazję". Natura nie przegapia takich okazji. Czuję, że Przyroda wyda wyrok sprzyjający naszym „superideom" i rozpocznie się nowy złoty wiek fizyki cząstek elementarnych.

## Projekt LHC

W laboratorium CERN w pobliżu Genewy protony będą pędziły wokół tunelu o obwodzie 27 kilometrów z prędkością wynoszącą 0,999998 prędkości światła. Utworzą dwie zwarte wiązki mknące w przeciwnych kierunkach. Do ich zderzeń będzie dochodziło w czterech punktach oddziaływania, w których detektory o rozmiarach pięciopiętrowego biurowca będą monitorowały przebieg tych wybuchowych kolizji. Tak w skrócie wygląda projekt badań za pomocą Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC, *Large Hadron Collider*). Jeżeli chcecie sobie wyrobić wyobrażenie na temat rozmiaru akceleratora i jednego z jego kluczowych detektorów, spójrzcie na ryciny nr 8, 9 i 11 zamieszczone na kolorowej wkładce.

Pod względem rozmiaru LHC jest odpowiedzią naszej cywilizacji na piramidy starożytnego Egiptu. Jednak pod wieloma względami jest to monument dużo bardziej szlachetny. Zrodziła go ciekawość, nie zabobon. Powstał dzięki współpracy, nie za sprawą despotycznej władzy.

Poza tym gigantyczne rozmiary LHC nie są celem samym w sobie, ale jedynie efektem ubocznym jego przeznaczenia. Tak naprawdę fizyczne rozmiary tego projektu nie są jedynym, ani nawet najbardziej imponującym jego wymiarem. Wewnątrz długiego tunelu ustawiono wykonane z największą precyzją nadprzewodzące magnesy. Każdy z tych potężnych gigantów ma długość 15 metrów, a mimo to wykonano je z dokładnością do ułamków milimetra. Układy elektroniczne zapewniają doskonałą synchronizację, która ma kluczowe znaczenie w tym przedsięwzięciu. Podczas oddzielania od siebie zderzeń i śledzenia cząstek znaczenie mają nawet nanosekundy.

Ogrom zalewu danych, które wypływają z tych urządzeń szerokim strumieniem, nie mieści się nie tylko w głowie, lecz także w sieciach komputerowych. Szacuje się, że LHC będzie każdego roku dostarczał 15 petabajtów ($1{,}5 \times 10^{16}$ bajtów) informacji. Można to porównać z koniecznością przydzielenia pasma o szerokości wystarczającej do prowadzenia jednocześnie pół miliona trwających bez przerwy rozmów telefonicznych. Aby uporać się z tym problemem, opracowuje się nowe architektury sieci, umożliwiające rozdzielenie obciążenia na tysiące komputerów rozmieszczonych na całym świecie. Wykorzystuje się do tego przetwarzanie sieciowe, nazywane też czasem siatką komputerową.

LHC będzie dysponował energią wystarczająco dużą do sprawdzenia obydwu naszych potężnych założeń.

Z dosyć dużą wiarygodnością potrafimy oszacować, jakiej energii potrzeba do uwolnienia fragmentu kondensatu odpowiedzialnego za (elektrosłabe) nadprzewodnictwo Siatki. Oddziaływanie słabe ma krótki zasięg, ale nie jest on nieskończenie mały. Wuony i zetony są ciężkie, ale ich masy nie są nieskończone. Obserwowany zasięg siły i masa jej cząstek pośredniczących daje nam solidne podstawy do określenia, jaką sztywność ma kondensat odpowiedzialny za te efekty. Znając sztywność, możemy oszacować, jak dużej energii potrzeba do oderwania pojedynczych kawałków (kwantów) kondensatu – czyli, mówiąc prozaicznie, do wytworzenia cząstek Higgsa lub innych cząstek czy fragmentu lub też czegokolwiek

innego, co sprawia, że Siatka jest kosmicznym nadprzewodnikiem. Jeżeli tylko z jakiegoś powodu nie jesteśmy w *dużym* błędzie, LHC powinien poradzić sobie z tym zadaniem.

Podobnie rzecz ma się z supersymetrią. Chcemy, by fluktuacje Siatki związane z polami supersymetrycznymi, odpowiednikami znanych pól, pozwoliły na zbliżenie do siebie stałych sprzężenia oddziaływań. Jeśli mają się do tej roli nadawać, to wzbudzenia związane z tymi polami nie powinny być zbyt ciężkie. Niektóre z tych wzbudzeń – niektóre nowe cząstki supersymetryczne, odpowiedniki znanych nam cząstek – muszą więc zostać wytworzone i wykryte w LHC.

Jeśli cząstki supersymetryczne rzeczywiście się pokażą, otworzą przed nami nowe możliwości w fizyce cząstek elementarnych. Masy i sprzężenia tych cząstek, tak jak sprzężenia podstawowych oddziaływań Rdzenia, będą zniekształcone w wyniku fluktuacji Siatki. Przewiduje się jednak, że szczegóły tych zniekształceń będą inne, bardzo charakterystyczne. Jeśli wszystko potoczy się po naszej myśli, udane (choć jednostkowe i oparte na niepewnych podstawach) sformułowanie unifikacji, którym dzisiaj dysponujemy, rozkwitnie być może i da początek bogatej różnorodności potwierdzających się wzajemnie wyników.

## Równowaga za sprawą ciemnej materii

Pod koniec XX wieku fizycy złożyli w całość odnoszącą niezwykłe sukcesy teorię materii, którą my nazwaliśmy Rdzeniem. Teoria ta, choć zwięzła, podaje pełne i dokładne wyjaśnienie podstawowych praw rządzących materią – jest ukoronowaniem stuleci ciężkiej pracy.

W tym samym jednak czasie, gdy fizycy kończyli prace nad tą teorią, astronomowie dokonali zadziwiających nowych odkryć, które spowodowały, że ponownie poczuliśmy pokorę. Odkryli oni, że materia, którą badaliśmy przez wszystkie te stulecia – zajmując się biologią, chemią, inżynierią i geologią; z której sami jesteśmy zbudowani i którą dogłębnie rozumiemy dzięki teorii Rdzenia –

że owa substancja, *zwykła* materia, stanowi zaledwie około 5% masy całego Wszechświata!

Pozostałe 95% zawiera przynajmniej dwa inne składniki nazywane ciemną energią i ciemną materią.

Ciemna energia jest źródłem około 70% masy Wszechświata. Udało się ją wykryć jedynie pośrednio, za sprawą wpływu grawitacyjnego, jaki wywiera na ruch zwykłej materii. Nie stwierdzono, by emitowała lub pochłaniała światło; nie jest ona ciemna w tradycyjnym znaczeniu tego słowa – jest raczej przezroczysta. Wydaje się, że ciemna energia jest rozmieszczona równomiernie w całej przestrzeni, a jej gęstość nie zmienia się w czasie. Teoria ciemnej energii jest obecnie w kiepskim stanie. Problemem tym trzeba się będzie zająć w przyszłości.

Ciemna materia stanowi około 25% masy Wszechświata. Ją również wykryto jedynie poprzez oddziaływanie grawitacyjne, jakie wywiera na ruch zwykłej materii. Ciemna materia *nie* jest rozmieszczona równomiernie w przestrzeni, a jej gęstość nie jest stała w czasie. Tworzy skupiska, chociaż nie tak zwarte jak zwykła materia. Wokół każdej dobrze zbadanej galaktyki astronomowie odkryli rozległe halo ciemnej materii. Te halo są rzadkie – ich gęstość jest najczęściej milion razy mniejsza od gęstości zwykłej materii w obszarach, w których występują obok siebie – ale obejmują dużo większe objętości niż zwykła materia. Zamiast mówić o galaktykach jako o obiektach z halo, powinniśmy raczej mówić, że zbudowana ze zwykłej materii galaktyka jest domieszką w obszarze ciemnej materii.

Problem ciemnej materii jest już moim zdaniem bliski rozwiązania[117].

Wśród nowych cząstek przewidywanych przez SUSY jedna ma szczególne znaczenie – mam na myśli najlżejszą spośród nich cząstkę. Jej własności zależą od szczegółów, o których nie mamy jeszcze dobrego wyobrażenia (zwłaszcza konkretnych wartości mas wszystkich cząstek supersymetrycznych). Musimy więc wypróbować wszystkie możliwości. Okazuje się, że w wielu przypadkach najlżejsza cząstka supersymetryczna ma niezwykle długi czas życia (dłuższy

od wieku Wszechświata) i bardzo słabo oddziałuje ze zwykłą materią. Najbardziej uderzające jest jednak to, że gdy opisujące ją równania łączymy z teorią Wielkiego Wybuchu, żeby się przekonać, ile takich cząstek powinno przetrwać do chwili obecnej, uzyskujemy wartość właśnie taką, jaka jest potrzebna do wyjaśnienia ciemnej materii. Oczywiście, wszystko to sugeruje, że najlżejsza cząstka supersymetryczna *jest* ciemną materią.

Całkiem więc możliwe, że badając podstawowe prawa fizyki na niezwykle małych odległościach, rozwiążemy główną zagadkę kosmologiczną i pozbędziemy się choć trochę owej irytującej pokory. Jeżeli pojawi się cząstka mogąca być składnikiem ciemnej materii, wielkim zadaniem stanie się wówczas konieczność sprawdzenia, czy ona rzeczywiście się do tej roli nadaje. Od strony teoretycznej będziemy musieli ustalić szczegółowo wszystkie reakcje związane z procesem jej powstania w Wielkim Wybuchu, a następnie wyznaczyć potrzebne wartości liczbowe. Od strony doświadczalnej konieczne będzie upewnienie się, że owa kandydatka na ciemną materię faktycznie występuje w kosmosie. Gdy się już wie, czego szukać, odnalezienie tego staje się znacznie prostsze.

Na gruncie innej propozycji poprawienia równań fizyki pojawiła się jeszcze jedna obiecująca próba wyjaśnienia natury ciemnej materii. Jak mówiliśmy, chromodynamika kwantowa w głębokim i dosłownym sensie powstała jako ucieleśnienie symetrii. W ramach szczególnej teorii względności i mechaniki kwantowej obserwujemy niemal doskonałe dopasowanie między obserwowanymi własnościami kwarków i gluonów a najogólniejszymi własnościami dopuszczanymi przez lokalną symetrię koloru. Jedynym wyjątkiem jest fakt, że uznane symetrie QCD dopuszczają istnienie pewnego zachowania, którego nie możemy jednak zaobserwować w doświadczeniach. Symetrie te pozwalają mianowicie, by między gluonami dochodziło do oddziaływań niszczących symetrię równań QCD ze względu na zmianę kierunku upływu czasu. Doświadczenia nakładają poważne ograniczenia na możliwą wartość siły tych oddziaływań. Ograniczenia te są dużo bardziej rygorystyczne, niż należałoby oczekiwać w przypadku, gdyby powstały przypadkowo.

Teoria Rdzenia nie wyjaśnia tego „zbiegu okoliczności”. Roberto Peccei i Helen Quinn znaleźli sposób na rozszerzenie równań w taki sposób, by tłumaczyły ten fakt. Steven Weinberg i ja niezależnie wykazaliśmy, że rozszerzone równania wskazują na istnienie nowych, bardzo lekkich i bardzo słabo oddziałujących cząstek zwanych aksjonami. Również one są poważnymi kandydatkami na składnik kosmologicznej ciemnej materii. W zasadzie można by je wykryć na różne sposoby. Chociaż żaden z nich nie jest prosty, poszukiwania trwają.

Możliwe również, że obydwie idee są poprawne i na całkowitą ilość ciemnej materii składają się obydwa rodzaje cząstek. Czyż nie jest to piękna wizja?

## Pierwsza jaskółka już jest – czekamy na kolejne

Unifikacja sił Rdzenia wiąże się z większą symetrią, a z niej z kolei wynika istnienie dodatkowych sił. Aby wyjaśnić, jak te dodatkowe siły, których nigdy nie zaobserwowano, ulegają wygaszeniu, postulujemy istnienie w Siatce drugiej, jeszcze sztywniejszej warstwy kosmicznego nadprzewodnictwa[118]. Nie chcemy jednak całkowicie ich wygaszać. W skali unifikacji – w wysokiej energii lub, co równoważne, na małych odległościach – i powyżej oddziaływania te łączą się z Rdzeniem i mają taką samą siłę.

Fluktuacje kwantowe – cząstki wirtualne – niezwykle rzadko osiągają tak olbrzymie energie, ale zdarza się, że do tego dochodzi. Jak się można spodziewać, przewiduje się, że efekty powodowane przez takie fluktuacje są bardzo małe, ale nie zerowe. Dwa z nich są tak niezwykłe i zupełnie nieoczekiwane, że uważa się je za klasyczne oznaki fizyki unifikacji.

- Neutrina powinny mieć masę.
- Protony powinny się rozpadać[119].

Pierwszą jaskółkę już ujrzeliśmy. Jak wspomnieliśmy wcześniej, neutrina rzeczywiście mają bardzo małą wprawdzie, ale jednak

niezerową masę. Zaobserwowane masy zasadniczo zgadzają się z wartościami wynikającymi z unifikacji.

Czekamy na pojawienie się drugiej jaskółki. Głęboko pod powierzchnią ziemi olbrzymie kolektory fotonów monitorują potężne kadzie wypełnione oczyszczoną wodą, wyczekując na rozbłyski oznaczające śmierć protonów. Nasze oszacowania tempa tego procesu sugerują, że odkrycie powinno nastąpić już wkrótce. Jeśli do tego dojdzie, otworzy się przed nami jeszcze jedna droga prowadząca do fizyki unifikacji – być może najprostsza i najpotężniejsza. Protony bowiem mogą ulegać rozpadowi na różne sposoby i tempa tych różnych rozpadów są bezpośrednim odzwierciedleniem nowych oddziaływań wynikających z unifikacji.

Połączenie teorii oddziaływań Rdzenia – silnego, słabego i elektromagnetycznego – w jedną zunifikowaną teorię wymaga znalezienia odpowiedzi na kilka pytań, ale zasady są jasne. Mechanika kwantowa, szczególna teoria względności i (lokalna) symetria pasują doskonale do siebie. Wykorzystując je, możemy zaproponować przeprowadzenie konkretnych badań doświadczalnych, razem z podaniem liczbowych oszacowań oczekiwanych wyników.

Również włączenie w ten obraz grawitacji, jak widzieliśmy, wygląda obiecująco na poziomie porównania podstawowej siły wszystkich oddziaływań. Jednak w tym przypadku nasze wyobrażenia na temat zunifikowanej teorii nie są już nawet w przybliżeniu tak precyzyjne. Obfitość idei związanych z teorią superstrun wydaje się obiecująca, jednak nikomu nie udało się jeszcze połączyć ich ze sobą na tyle, by zasugerować, jakich konkretnie nowych efektów należałoby oczekiwać[120]. Jaka jaskółka będzie zwiastowała unifikację obejmującą grawitację? Czy możemy mieć nadzieję, że doczekamy chwili jej przylotu? To również jest pytanie na przyszłość.

117 Tematyce ciemnej materii, ciemnej energii i ogólnie współczesnej kosmologii poświęcona jest ciekawa książka popularnonaukowa: *Quintessence* Lawrence'a Kraussa.

118 Kwestie te dokładniej omawiam w dodatku B.

119 Obliczenia dowodzące, że (niskoenergetyczna) supersymetria prowadzi do dokładnej unifikacji sił, w niewielkim stopniu zależą od szczegółów, co stanowi zarówno o ich sile, jak i słabości. Wkład nowych cząstek w ekranowanie (lub antyekranowanie) uaktywnia się dopiero w energiach większych od energii spoczynkowych $mc^2$ tych cząstek. Zmiany o kluczowym znaczeniu dla unifikacji akumulują się w szerokim zakresie energii i dlatego to, gdzie się zaczynają, nie ma większego znaczenia. Z tego samego powodu również wkład wnoszony przez poszczególne cząstki w umiarkowanym jedynie stopniu zależy od ich masy. Zatem wynik naszych obliczeń unifikacyjnych nie zmieniłby się specjalnie, gdyby masy nowych cząstek supersymetrycznych były (powiedzmy) dwukrotnie większe lub mniejsze. Uzyskany wynik jest sztywny: nie poddaje się łatwo próbom zmiany. Natomiast zjawisko rozpadu protonu zależy od przyjętych szczegółów.

120 Teoria strun wywołała rozważania na temat istnienia dodatkowych wymiarów przestrzennych. Wymiary te musiałyby być albo bardzo małe (zwinięte), albo niezwykle poskręcane i tym samym trudne do przebycia, w przeciwnym bowiem przypadku zauważylibyśmy ich istnienie. Być może gdy przyjrzymy się światu bliżej, za pomocą LHC, uda nam się je wykryć. Rozważania na ten temat znajdziecie w książkach: *Hiding in the Mirror* Lawrence'a Kraussa i *Warped Passages* Lisy Randall.

# Epilog

# Gładki kamyk, ładna muszla

*Wydaje mi się, że byłem jedynie chłopcem bawiącym się na brzegu morza, którego uwagę przykuwał od czasu do czasu jakiś kamyk gładszy niż zwykle, jakaś muszla ładniejsza od innych, podczas gdy u moich stóp rozciągał się wielki, wciąż nieodkryty ocean prawdy.*

Izaak Newton

Wdrapaliśmy się już na trzeci szczyt i dotarliśmy do miejsca, w którym możemy się zatrzymać. Czas, byśmy odpoczęli, spojrzeli za siebie i delektowali się rozciągającym się przed nami widokiem.

Spoglądając w dół, w dolinę codziennej rzeczywistości, dostrzegamy teraz znacznie więcej niż przed wyruszeniem w drogę. Pod znanym nam, spokojnym obrazem trwałej materii w pustej przestrzeni nasze umysły dopatrują się misternego tańca wzorów we wszechobecnym, od zawsze istniejącym, żywiołowym ośrodku. Dostrzegamy, iż masa, owa właściwość, która powoduje, że materia jest powolna i poddaje się naszej kontroli, ma swoje źródło w energii kwarków i gluonów bezustannie poruszających się z prędkością światła, zmuszonych do łączenia się ze sobą w celu ochrony przed ciosami owego ośrodka. Substancja, z której się składamy, jest pomrukiem niezwykłej, matematycznej muzyki, precyzyjniejszej i bardziej złożonej niż fuga Bacha – Muzyki Siatki.

W oddali, przez rozmyte chmury, widzimy zarysy matematycznego Raju, w którym elementy tworzące rzeczywistość pozbywają się swoich skaz. Nasze oczy nie są stworzone do oglądania takich

widoków, bierzemy więc poprawkę na wprowadzane przez nie zniekształcenia i konstruujemy w umyśle prawdziwy, jak sądzimy, obraz tych elementów: są czyste i idealne, symetryczne, równe i doskonałe.

A może za bardzo daliśmy się ponieść zwodniczej wyobraźni? Ustawiamy teleskop i czekamy, aż rozejdą się chmury.

# Wyznanie

Przed nami rozciągają się góry, ale ich szczytów nie widzimy jeszcze zbyt wyraźnie.

Zgodnie z obietnicą wyjaśniliśmy pochodzenie 95% masy zwykłej materii – okazało się, że wykorzystując drugie prawo Einsteina $m = E/c^2$ i spełniając zawartą w nim obietnicę, można dowieść, iż źródłem tej masy jest energia bezmasowych elementów składowych. Czas już, bym się przyznał, czego nie udało mi się wytłumaczyć.

W takich rozważaniach nie można pominąć masy elektronu, chociaż stanowi ona znacznie mniej niż 1% całkowitej masy zwykłej materii. Jej wartość decyduje o rozmiarze atomów. Gdybyśmy podwoili masę elektronu, wszystkie atomy skurczyłyby się o połowę; gdybyśmy ją zmniejszyli o połowę, atomy zwiększyłyby swoje rozmiary dwukrotnie. Zaistniałyby wówczas również inne zjawiska, za sprawą których życie w znanej nam postaci prawdopodobnie w ogóle nie byłoby możliwe. Gdyby elektrony były mniej więcej czterokrotnie cięższe, procesy fizyczne faworyzowałyby łączenie się ich z protonami, co prowadziłoby do powstawania neutronów i emisji neutrin. Oznaczałoby to gwóźdź do trumny dla chemii, nie mówiąc już o biologii, ponieważ nie byłoby wówczas ani obdarzonych ładunkiem elektrycznym jąder, ani elektronów, zatem nie mogłyby powstać atomy i złożone cząsteczki.

Mimo to nie za bardzo wiemy (jeszcze), dlaczego elektrony mają taką właśnie masę. Nie ma dowodów na to, by miały jakąś strukturę wewnętrzną (wiele dowodów wskazuje na coś wręcz przeciwnego),

zatem wyjaśnienie, jakie uzyskaliśmy w przypadku protonu, wiążące jego masę z wewnętrzną energią, w tym przypadku się nie sprawdzi. Musimy wymyślić coś nowego. Obecnie najlepsze, co możemy zrobić, to wprowadzić masę elektronu do równań jako parametr, którego nie potrafimy wyrazić za pomocą żadnej bardziej podstawowej konstrukcji.

Podobnie rzecz się ma z masami naszych przyjaciół – kwarków górnych (*u*) i dolnych (*d*). Ilościowo wnoszą one niewiele do masy protonów i neutronów, a tym samym i do zwykłej materii, jednak wartości ich mas mają kluczowe znaczenie. Gdyby były znacząco różne od ich rzeczywistej wartości, powstanie życia stałoby się bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Mimo to nie potrafimy wyjaśnić, dlaczego cząstki te mają takie właśnie masy.

Nie rozumiemy również wartości mas cięższych, nietrwałych klonów elektronów – to znaczy mionów ($\mu$) i taonów ($\tau$), które są, kolejno, 209 i 3478 razy cięższe od elektronów. Nie wiemy, skąd wzięły się liczby 209 oraz 3478. To samo dotyczy przypadku cięższych, nietrwałych klonów kwarka górnego – czyli kwarków: powabnego (*c*) i wysokiego (*t*) – oraz kwarka dolnego – to znaczy kwarków: dziwnego (*s*) i niskiego (*b*).

Jedyną dobrą informacją jest to, że wymienione kwarki i leptony (czyli miony i taony) wydają się blisko ze sobą związane, zarówno pod względem obserwowanych własności, jak i teoretycznie – w ramach omawianych w poprzednich rozdziałach zunifikowanych teorii. Jeśli więc uda nam się zrozumieć jedną z tych cząstek – i jeśli zunifikowane teorie są poprawne! – będziemy mogli dowiedzieć się wszystkiego o pozostałych.

Fakt, że tak niewiele wciąż wiemy na temat pochodzenia mas kwarków, oznacza, iż moje wyjaśnienie słabości grawitacji jest niepełne – opiera się bowiem na obserwacji, że proton jest lekki w porównaniu z masą Plancka. Przyjąłem za pewnik, że większa część masy protonu wynika z energii zawartych w nim kwarków i gluonów, zgodnie z drugim prawem Einsteina. I rzeczywiście, w Przyrodzie tak to właśnie jest: kwarki *u* oraz *d* mają bardzo małe masy, dużo mniejsze od masy protonu, więc ich bezpośredni wkład w całkowitą masę tej cząstki jest niewielki. Gdybyście jednak zapytali

mnie, *dlaczego* masy tych kwarków są małe, nie potrafiłbym na to pytanie przekonująco odpowiedzieć (choć zapewne mógłbym snuć różne dywagacje).

No i jest jeszcze cząstka Higgsa, o której czasami mówi się, że stanowi „źródło masy" i nazywa się ją nawet „boską cząstką". W dodatku B przedstawiłem ciekawy ciąg idei osnutych wokół cząstki Higgsa. Mówiąc krótko, pole Higgsa (które jest bytem bardziej podstawowym niż cząstka) pozwala nam wprowadzić w życie wizję powszechnego kosmicznego nadprzewodnika i jest ucieleśnieniem pięknego pojęcia spontanicznego łamania symetrii. Są to idee głębokie, niezwykłe, wspaniałe i bardzo możliwe, że prawdziwe. Nie wyjaśniają jednak pochodzenia masy – nie mówiąc już o pochodzeniu Boga. Chociaż prawdą jest, że pole Higgsa pozwala nam *uzgodnić* istnienie pewnych rodzajów mas ze szczegółami funkcjonowania oddziaływań słabych, daleko jeszcze od tego do wyjaśnienia pochodzenia masy[121] czy wytłumaczenia, dlaczego różne masy mają takie a nie inne wartości. Jak się przekonaliśmy, pochodzenie większej części masy zwykłej materii nie ma nic wspólnego z cząstkami Higgsa.

Nie rozumiemy też tak naprawdę mas neutrin. I *absolutnie* nie rozumiemy mas gąszczu niewykrytych dotąd cząstek pojawiających się w teoriach, między innymi cząstki (lub cząstek) Higgsa, wszystkich cząstek związanych z supersymetrią, aksjonów…

Krócej moglibyśmy podsumować tę sytuację, mówiąc, że jedynym przypadkiem, w którym *rzeczywiście* rozumiemy pochodzenie masy, jest ten omówiony w niniejszej książce. Na szczęście, wyjaśnienie to dotyczy lwiej części masy zwykłej materii – materii składającej się z elektronów, fotonów, kwarków i gluonów – tej, która dominuje w naszym bezpośrednim otoczeniu, którą zajmują się biologowie i chemicy i z której sami jesteśmy zbudowani.

## Jeszcze raz ciemność

Jednym z wielkich odkryć astronomii (a może i największym) było ustalenie, że odległe gwiazdy i mgławice zbudowane są z takiej samej materii jak ta, którą spotykamy na Ziemi. W ostatnich dziesięcioleciach astronomowie zadali jednak w pewnym sensie kłam tej podstawowej prawdzie. Odkryli, że znakomitą większość masy Wszechświata, około 95%, stanowi coś innego. Za tą przeważającą częścią jego masy stoją nowe formy materii, które nie składają się z elektronów, fotonów, kwarków czy gluonów.

Ta nowa substancja występuje przynajmniej w dwóch odmianach, zwanych ciemną materią i ciemną energią. Nie są to specjalnie dobrze dobrane nazwy, ponieważ jedną z nielicznych cech tej substancji, które znamy, jest to, że nie jest ciemna – nie pochłania światła w żadnym dającym się wykryć stopniu. Nie zaobserwowano też, by emitowała światło. Wydaje się, że jest doskonale przezroczysta. Nie widziano również, by emitowała protony, elektrony, neutrina czy promienie kosmiczne jakiegokolwiek rodzaju. Krótko mówiąc, zarówno ciemna materia, jak i ciemna energia bardzo słabo oddziałują ze zwykłą materią, jeśli w ogóle. Udało się je wykryć jedynie za sprawą wpływu grawitacyjnego, jaki wywierają na orbity zwykłych gwiazd i galaktyk – obiektów, które możemy oglądać przez teleskopy.

Niewiele mamy pewnych informacji o ciemnej materii. Jak już mówiliśmy, możliwe, że jest zbudowana z cząstek supersymetrycznych albo z aksjonów. (Do aksjonów czuję szczególny sentyment, po części dlatego, że sam wymyśliłem dla nich nazwę. Wykorzystałem tę okazję, by spełnić swoje marzenie z czasów młodości. Kiedyś moją uwagę przykuła nazwa proszku do prania: „Axion" – wydawało mi się, że brzmi jak nazwa jakiejś cząstki. Gdy więc w jednej z teorii pojawiła się hipotetyczna cząstka umożliwiająca *oczyszczenie* teorii z problemu z prądem aksjalnym – ang. „*axial* current" – wyczułem w tym jakiś kosmiczny zbieg okoliczności. Największym wyzwaniem było uzyskanie zgody na publikację artykułu z nową nazwą cząstki w czasopiśmie „Physical Review Letters", którego redaktorzy znani są z konserwatywnych poglądów. Powiedziałem im więc o prądzie aksjalnym, ale ani słowem nie wspomniałem o proszku do prania. Udało się). Prowadzi

się obecnie zakrojone na szeroką skalę doświadczenia, których celem jest sprawdzenie tych i innych możliwości, i jeśli dopisze nam szczęście, za kilka lat będziemy mieli dużo lepsze pojęcie na temat budowy ciemnej materii.

Jeszcze mniej wiadomo o ciemnej energii. Wydaje się, że jest doskonale równomiernie rozmieszczona: wszędzie i w każdym czasie ma taką samą gęstość, jak gdyby była nieodłączną własnością czasoprzestrzeni. W przeciwieństwie do konwencjonalnych rodzajów materii (nawet cząstek supersymetrycznych czy aksjonów) ciemna energia wywiera ujemne ciśnienie. Usiłuje rozerwać nas na strzępy! Na szczęście, chociaż stanowi około 70% masy całego Wszechświata, jej gęstość jest równa zaledwie około $7 \times 10^{-30}$ gęstości wody, a jej ujemne ciśnienie równoważy jedynie $7 \times 10^{-14}$ normalnego ciśnienia atmosferycznego – czyli mniej niż jedną część na bilion. Nie wiem, kiedy będziemy wiedzieli coś więcej na temat natury ciemnej energii. Wydaje mi się, że nie szybko, ale chciałbym się mylić.

# Słowo końcowe

Pokazałem wam mój ulubiony gładki kamyk, najładniejszą muszlę i nieodkryty ocean. Mam nadzieję, że się wam podobało. W końcu to wasz świat.

121 Zgodnie z ideami przedstawionymi w dodatku B kondensat Higgsa w wyniku swoistego kosmicznego nadprzewodnictwa bezpośrednio odpowiada za masy wuonów i zetonów. Jeśli więc idee te są poprawne, po wyjaśnieniu, czym jest ów kondensat, zrozumiemy pochodzenie tych konkretnych mas.

# Podziękowania

Książka ta jest w dużej mierze pokłosiem wykładów popularnonaukowych: „Wszechświat to dziwne miejsce”, „Świat jest liczbowym przepisem”, „Pochodzenie masy i słabość grawitacji” oraz „Trwałość eteru”, które wygłaszałem w ciągu ostatnich kilku lat w różnych instytucjach. Chciałbym podziękować za możliwość ich wygłoszenia osobom, które mnie zaprosiły, a słuchaczom za wiele interesujących pytań i użytecznych uwag.

Pragnę podziękować MIT za nieustanne wsparcie; Nordyckiemu Instytutowi Fizyki Teoretycznej „Nordita” za gościnę – w czasie pobytu w Sztokholmie powstała większa część tej książki; za gościnność jestem również wdzięczny Uniwersytetowi w Oksfordzie, gdzie dokończyłem pracę nad książką.

Chciałbym podziękować Betsy Devine i Alowi Shapere’owi za uważne przeczytanie rękopisu i zaproponowanie wielu istotnych poprawek. Jestem również wdzięczny Carol Breen za uwagi do rękopisu, a szczególnie za pomoc w pracy nad wczesną wersją rozdziału szóstego.

Słowa wdzięczności kieruję również pod adresem Johna Brockmana i Katinki Matson, którzy zachęcili mnie do napisania tej książki, a Billowi Fruchtowi, Sandrze Beris i pracownikom wydawnictwa Perseus dziękuję za okazaną pomoc i słowa otuchy.

W czasie powstawania tej książki największą inspiracją było dla mnie wsparcie i pomoc Betsy.

# Dodatki

# Dodatek A

# Cząstki mają masę, świat ma energię

W rozdziale trzecim zauważyliśmy, że równanie $E = mc^2$ obowiązuje dla ciał znajdujących się w spoczynku. W przypadku ciał poruszających się poprawne równanie masy-energii wygląda następująco:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

gdzie $v$ jest prędkością ciała. W przypadku ciała w spoczynku ($v = 0$) wzór ten przekształca się w $E = mc^2$.

Gdy jakieś ciało – na przykład proton lub elektron – przyspiesza, $v$ ulega zmianie, a $m$ pozostaje takie samo. Z równania wynika zatem, że $E$ musi się wówczas zmieniać.

Słysząc takie stwierdzenie po raz pierwszy, można odnieść wrażenie, że przeczy ono temu, o czym mówiliśmy w książce. Powiedzieliśmy, że *energia* jest zachowywana, ale *masa* nie. Co się dzieje?

Zasada zachowania energii stosuje się do układów, a nie do pojedynczych ciał. Całkowita energia układu ciał obejmuje wkład zarówno od energii ruchu (dany powyższym wzorem), jak i wyrazów opisujących „energię potencjalną”, która odzwierciedla oddziaływania

między tymi ciałami. Wyrazy energii potencjalnej, dane innymi wzorami, zależą od odległości między ciałami, ich ładunków elektrycznych, a być może i od innych parametrów. Zachowana zostaje jedynie całkowita energia takiego układu.

Ciało istniejące w osamotnieniu ma stałą prędkość. Wynika to z pierwszej zasady dynamiki Newtona, która w odróżnieniu od zasady zerowej, jak się wydaje, wciąż obowiązuje. Pojedyncze ciało możemy traktować jako układ sam w sobie. Jego energia powinna być zatem zachowana – i, wnioskując na podstawie wzoru, rzeczywiście jest.

I odwrotnie, gdy prędkość jakiegoś ciała ulega zmianie, fakt ten jest sygnałem, iż ciało to nie istnieje w izolacji. Jakieś inne ciało musi wywierać na nie wpływ i powodować zmianę prędkości. Podczas wzajemnego oddziaływania ciał, ogólnie rzecz biorąc, dochodzi do przesyłania między nimi energii. Zachowana zostaje jedynie energia całkowita, lecz nie energia każdego z ciał z osobna.

Oba te pojęcia mają znaczenie w procesie, w którym z kwarków i gluonów powstaje proton. Z perspektywy fizyki cząstek elementarnych będący w spoczynku proton jest układem złożonym oddziałujących ze sobą kwarków i gluonów. Poszczególne kwarki i gluony mają bardzo małe masy. To jednak nie przeszkadza, by cały układ miał pewną energię. Oznaczmy ją symbolem $E$. Będzie ona niezmienna w czasie dopóty, dopóki cały układ – czyli proton – będzie istniał w izolacji. Możemy też przyjąć, że taki samotny proton jest czarną skrzynką: „ciałem” o masie $m$. Obydwie wielkości pojawiające się w tych alternatywnych opisach są ze sobą powiązane równaniem $E = mc^2$ (lub $m = E/c^2$).

W rozdziale drugim omawialiśmy spektakularny przypadek pogwałcenia zasady zachowania masy. Gdy dochodzi do anihilacji elektronu i pozytonu, pojawia się grupa cząstek, których całkowita masa jest 30 tysięcy razy większa. Niemniej energia zostaje zachowana. Przed anihilacją prędkości elektronu i pozytonu były bardzo bliskie prędkości światła. Zgodnie z ogólnym równaniem masy-energii, ich energia jest więc bardzo duża – znacznie przekracza $mc^2$. Cząstki powstające w wyniku zderzenia, chociaż

mają większą masę, poruszają się trochę wolniej. Gdy zsumuje się ich energie, wyliczone zgodnie z równaniem energii-masy, otrzymana wartość zgadza się z całkowitą energią elektronu i pozytonu przed anihilacją. (Gdy po anihilacji cząstki rozbiegają się i oddalają od siebie, ich energia oddziaływania – energia potencjalna – staje się zaniedbywalnie mała).

Aby dopełnić nasze rozważania na temat związku między masą i energią, musimy jeszcze rozważyć szczególny przypadek cząstek o zerowej masie. Ważnymi przykładami są tu fotony, gluony i grawitony. Cząstki takie poruszają się z prędkością światła. Jeśli spróbujemy do naszego ogólnego równania masy-energii wstawić $m = 0$ oraz $v = c$, po prawej jego stronie wyzeruje się zarówno licznik, jak i mianownik i uzyskamy pozbawiony sensu związek $E = 0/0$. Poprawnym wynikiem jest stwierdzenie, że energia fotonu może przyjmować dowolną wartość. Fotony o różnej energii nie różnią się między sobą ani prędkością, która jest zawsze równa prędkości światła $c$, ani oczywiście masą, która zawsze jest zerowa, lecz częstotliwością (to znaczy, tempem drgań leżących u podstaw istnienia tej cząstki pól elektrycznych i magnetycznych). Energia $E$ fotonu jest proporcjonalna do częstotliwości $v$ światła, którego jest nośnikiem. Mówiąc dokładniej, wielkości te są ze sobą związane równaniem Plancka–Einsteina–Schrödingera: $E = hv$, gdzie $h$ jest stałą Plancka.

W przypadku fotonów światła z zakresu widzialnego różnicę tę postrzegamy jako inną barwę: fotony z czerwonego krańca widma mają najmniejszą energię, natomiast fotony z krańca błękitnego – największą. Idąc dalej w kierunku coraz mniejszych energii, mamy kolejno fotony promieniowania podczerwonego, mikrofalowego i fal radiowych. Natomiast powyżej energii z zakresu światła widzialnego spotykamy fotony promieniowania ultrafioletowego, rentgenowskiego i gamma.

# Dodatek B

# Wielowarstwowy, różnokolorowy kosmiczny nadprzewodnik

*Żyjemy we wnętrzu dziwnego nadprzewodnika, który skrywa przed nami symetrię świata.*

Najbardziej podstawową własnością nadprzewodników nie jest to, że niezwykle dobrze przewodzą prąd elektryczny (chociaż oczywiście to prawda). Najważniejszą ich własność odkryło w 1933 roku dwóch uczonych: Walther Meissner i Robert Ochsenfeld. Chodzi o tak zwany efekt Meissnera. Uczeni ci zauważyli, że pola magnetyczne nie wnikają do wnętrza nadprzewodników – ich zasięg jest ograniczony do cienkiej warstwy powierzchniowej. Nadprzewodniki nie znoszą pól magnetycznych. To jest właśnie ich najbardziej podstawowa własność.

Swoją nazwę zawdzięczają bardziej oczywistej i efektownej własności, szczególnemu talentowi do podtrzymywania prądu elektrycznego. Nadprzewodniki potrafią przewodzić prąd bez oporu, tym samym prąd może utrzymywać się wiecznie, nawet bez wymuszającej go baterii. A oto związek między efektem Meissnera i nadprzewodnictwem.

Jeżeli jakieś nadprzewodzące ciało wystawimy na działanie zewnętrznego pola magnetycznego, to zgodnie z efektem Meissnera ciało to musi znaleźć jakiś sposób, by zrównoważyć to pole tak, by w jego wnętrzu nie było żadnego pola wypadkowego. Może tego dokonać, jedynie gdy wytworzy własne pole magnetyczne: o takiej

samej wartości, lecz przeciwnie skierowane. Jak wiemy, pola magnetyczne powstają w wyniku przepływu prądu. Aby zatem nadprzewodzące ciało mogło wytworzyć pole magnetyczne utrzymujące wypadkową wartość pola w jego wnętrzu na poziomie zero, musi mieć właściwość pozwalającą na dowolnie długie podtrzymywanie przepływu prądu.

Możliwość przepływu prądu bez oporu wynika zatem z efektu Meissnera. Efekt ten jest bardziej podstawowy, stanowi on prawdziwą cechę charakterystyczną nadprzewodnika.

Efekt Meissnera zachodzi nie tylko w przypadku rzeczywistych pól magnetycznych, lecz także pojawia się, gdy takie pola powstają w wyniku fluktuacji kwantowych. Dlatego wewnątrz nadprzewodnika zmieniają się własności wirtualnych fotonów, które są fluktuacjami pól elektrycznych i magnetycznych. Nadprzewodnik stara się jak może zrównoważyć takie fluktuujące pola magnetyczne. W efekcie wirtualne fotony pojawiają się wewnątrz nadprzewodnika rzadziej i przebywają mniejsze odległości niż w pustej[122] przestrzeni.

W modelu świata wykorzystującym pojęcie Siatki siły elektryczne i magnetyczne są wynikiem wzajemnych oddziaływań między źródłami ładunku a wirtualnymi fotonami, czyli inaczej fluktuacjami pola. Cząstka A wywiera wpływ na fluktuacje otaczającego ją pola, co wywiera wpływ również na inną cząstkę, B. Tak wygląda nasz najbardziej podstawowy obraz mechanizmu powstawania sił między A i B. To właśnie widać na pierwszym diagramie Feynmana przedstawionym na rysunku 7.4.

Z faktu, że fluktuacje pola wewnątrz nadprzewodnika są rzadkie i mają mniejszy zasięg, wynika zatem, iż związane z nimi siły magnetyczne i elektryczne ulegają tam faktycznemu osłabieniu. W szczególności siły te przestają działać na większych odległościach.

Prądy znoszące pole utrudniają życie wewnątrz nadprzewodnika również rzeczywistym fotonom. W jego wnętrzu potrzeba większej energii, by wytworzyć samonapędzające się zaburzenia pola – a jak wiemy, fotony są takimi właśnie zaburzeniami. W równaniach efekt ten widzimy jako nadanie fotonom niezerowej masy. Krótko mówiąc: wewnątrz nadprzewodnika fotony są ciężkie.

# Kosmiczne nadprzewodnictwo: warstwa elektrosłaba

Oddziaływanie elektrosłabe jest siłą o małym zasięgu. Odpowiedzialne za nie pola – *W* oraz *Z* – pod wieloma względami przypominają pole elektromagnetyczne. Cząstki powstające jako zaburzenia tych pól (wuony i zetony) przypominają fotony. Podobnie jak te ostatnie, są bozonami. Tak jak fotony, reagują na ładunki – oczywiście nie elektryczne, ale ładunki o podobnych własnościach fizycznych, nazwane przez nas ładunkami zielonymi i fioletowymi. Najbardziej oczywistą różnicą między fotonami a wuonami i zetonami jest to, że te ostatnie są ciężkie. (Każda z tych cząstek waży mniej więcej tyle co sto protonów).

Krótki zasięg działania siły. Ciężkie cząstki. Brzmi znajomo? Powinno. Dokładnie takie własności mają siły elektromagnetyczne i fotony wewnątrz nadprzewodników.

Współczesna teoria oddziaływań elektrosłabych w dużej mierze opiera się na analogii między tym, co dzieje się z fotonami wewnątrz nadprzewodników, a obserwowanymi w kosmosie własnościami wuonów i zetonów. Z tej części teorii Rdzenia wynika, że to, co postrzegamy jako pustą przestrzeń – Siatka – *jest* w istocie nadprzewodnikiem.

I chociaż podobieństwa pojęciowe i matematyczne sięgają bardzo głęboko, nadprzewodnictwo Siatki różni się od konwencjonalnego nadprzewodnictwa w czterech aspektach:

**Występowanie** Konwencjonalne nadprzewodnictwo wymaga odpowiednich materiałów i niskich temperatur. Nawet najnowsze „wysokotemperaturowe” nadprzewodniki pozwalają podwyższyć temperaturę jedynie do 200 kelwinów (temperatura pokojowa to około 300 K).

Nadprzewodnictwo Siatki występuje wszędzie i nie udało się nigdy znaleźć miejsca, w którym by się załamywało. Teoretycznie powinno się ono utrzymywać aż do około $10^{16}$ kelwinów.

**Skala** Masa fotonu wewnątrz konwencjonalnego nadprzewodnika wynosi najwyżej około $10^{-11}$ masy protonu.

Masy wuonów i zetonów wynoszą około $10^{2}$ mas protonu.

**Przenoszone ładunki** Prądy w konwencjonalnych nadprzewodnikach są przepływem ładunków elektrycznych. W wyniku takich przepływów zmniejsza się zasięg pól elektromagnetycznych, a fotony uzyskują masę.

Prądy nadprzewodnictwa Siatki związane są z przepływem mniej znanych rodzajów ładunków: fioletowych ładunków oddziaływania słabego i hiperładunków. W wyniku takich przepływów powstają pola *W* oraz *Z*, co zmniejsza zasięg wytwarzanych przez nie sił, a wuony i zetony uzyskują masę.

**Substrat** Chociaż wiele szczegółów pozostaje wciąż niewyjaśnionych, ogólnie rozumiemy, jak działają konwencjonalne nadprzewodniki. (W przypadku wielu materiałów nadprzewodzących mamy całkiem szczegółową i dokładną teorię; w pozostałych przypadkach, włącznie z tak zwanymi nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi, prace wciąż trwają). W szczególności wiemy, z czego składają się owe nadprzewodnikowe przepływy. Są to strumienie elektronów uporządkowanych w tak zwane pary Coopera.

Nie mamy natomiast godnej zaufania teorii wyjaśniającej, z czego składają się nadprzewodnikowe przepływy Siatki. Żadne z pól, które udało nam się dotąd zaobserwować, nie ma odpowiednich własności. Teoretycznie możliwe jest, że zadanie to spełnia nowe pojedyncze pole, tak zwane pole Higgsa, wraz z towarzyszącą mu cząstką Higgsa. Możliwe również, że w procesie tym bierze udział kilka pól. W teoriach wykorzystujących supersymetrię, która bardzo często pojawia się w rozważaniach na temat unifikacji, występują przynajmniej dwa pola uczestniczące w takich nadprzewodnikowych przepływach – towarzyszy im co najmniej pięć cząstek. (Używając języka z rozdziału ósmego, powiedzielibyśmy, że są dwa kondensaty i pięć różnych rodzajów zaburzeń pola). Sytuacja może być jeszcze bardziej skomplikowana. Tego nie wiemy. Jednym z głównych celów stawianych przed LHC jest przeprowadzenie doświadczeń związanych z tymi kwestiami.

Nadprzewodnictwo Siatki nie obejmuje ładunków koloru oddziaływania silnego, dlatego na gluony nie działają żadne ograniczenia i mają one zerową masę. Nie wpływa ono również

na fotony. W przeciwieństwie do wuonów i zetonów, które w wyniku działania nadprzewodnikowych prądów równoważących pola mają znacznie zredukowany wpływ i zasięg oddziaływania, fotony pozostają bezmasowe. Na szczęście dla nas – bo przecież od wigoru sił elektromagnetycznych zależy działanie urządzeń elektrycznych i elektronicznych, nie wspominając już o naszych zbudowanych na zasadach chemii ciałach – nadprzewodnikowe prądy Siatki są elektrycznie obojętne.

## Kosmiczne nadprzewodnictwo: warstwa silnosłaba

Rozważając te idee, możemy uczynić jeszcze jeden bardzo ważny krok.

W przypadku teorii oddziaływania elektrosłabego najważniejszym osiągnięciem nadprzewodnictwa Siatki jest wyjaśnienie, dlaczego oddziaływanie słabe *wydaje się* znacznie słabsze i mniej widoczne od siły elektromagnetycznej, chociaż w podstawowych równaniach oddziaływania te występują na równych prawach. (Tak naprawdę, jak mówiliśmy, oddziaływanie słabe jest w istocie nieco silniejsze od elektromagnetycznego). Jeśli chodzi o symetrie Rdzenia, nadprzewodnictwo pozwala nam wyjaśnić redukcję

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1) \longrightarrow SU(3) \times U(1)$$

podstawowych symetrii Rdzenia: (silne × słabe × hiperładunek) do symetrii o dalekosiężnych konsekwencjach (silne × elektromagnetyczne).

Pracując z teoriami unifikacji, wykorzystujemy grupy symetrii dużo większe od $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, takie na przykład jak $SO(10)$. Gdy mamy więcej symetrii, pojawia się więcej możliwości przekształceń różnych rodzajów ładunków i więcej podobnych do gluonów, fotonów, wuonów i zetonów cząstek cechowania, które owe przekształcenia realizują.

Dodatkowe cząstki cechowania mogą dokonywać działań, które w rzeczywistości zdarzają się rzadko, jeśli w ogóle. Zmieniając na przykład jednostkę ładunku koloru oddziaływania słabego w jednostkę ładunku koloru oddziaływania silnego, możemy przekształcić kwark w lepton lub w antykwark. W Rejestrze Ładunków aż roi się od takich możliwości. Bez trudu więc możemy na przykład skonstruować rozpad[123]

$$p \longrightarrow e^{+} + \gamma$$

protonów na pozytony i fotony. Gdyby rozpad taki zachodził z częstością bliską wartości typowej dla oddziaływania słabego, dochodziłoby do niego w ciągu niewielkiego ułamka sekundy. Znaleźlibyśmy się wówczas w poważnych tarapatach, ponieważ nasze ciała szybko by wyparowały i zmieniły się w elektronowo-pozytonową plazmę.

Aby powstrzymać niechciany proces, zachowując przy tym leżącą u jego podstaw symetrię unifikacji, możemy zastosować nową warstwę nadprzewodnictwa Siatki. Wtedy uzyskamy, przechodząc od bardzo małych do większych odległości, następującą redukcję aktywnych (niewygaszonych) pól:

$$SO(10) \longrightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \longrightarrow SU(3) \times U(1)$$

Drugi krok uczyniliśmy już wcześniej, w Rdzeniu.

Do zrobienia pierwszego kroku potrzebne będą dużo bardziej efektywne nadprzewodnikowe prądy Siatki. Muszą z całą mocą wygasić niepotrzebne przekształcenia ładunku koloru między oddziaływaniem silnym i słabym. Oznacza to oczywiście, że takie prądy same muszą być przepływami ładunków koloru oddziaływania silnego i słabego.

Żadna znana postać materii nie może zapewnić takich prądów. Bez trudu możemy jednak wymyślić nadające się do tego nowe pole przypominające pole Higgsa. Uczeni wysuwali jeszcze inne pomysły.

Może prądy te powstają pod wpływem ruchu cząstek, które pędzą wokół dodatkowych, niewielkich, zwiniętych wymiarów przestrzennych. Może są one drganiami strun owiniętych wokół takich właśnie wymiarów. Ponieważ energie potrzebne do zbadania tak małych odległości zdecydowanie przekraczają nasze obecne możliwości, spekulacje te trudno będzie sprawdzić.

Na szczęście, podobnie jak w przypadku teorii elektrosłabej, możemy poczynić dalsze postępy, przyjmując takie nadprzewodnikowe prądy za dane, bez wymyślania hipotez na temat tego, z czego się składają. Taką właśnie filozofię przyjąłem w części III niniejszej książki. Pozwoliło nam to odnieść zachęcające do dalszej pracy sukcesy i wysunąć bardzo konkretne przewidywania. Jeżeli obraz taki przejdzie pomyślnie dalsze badania, będziemy mogli z całą pewnością twierdzić, że żyjemy w wielowarstwowym, różnokolorowym kosmicznym nadprzewodniku.

122 A raczej: „pustej”.

123 Możecie sami sprawdzić, że w wyniku emisji bozonu unoszącego ze sobą jednostkę ładunku czerwonego i przynoszącego jednostkę ładunku fioletowego (to znaczy, *zabierającego ze sobą ujemną* jednostkę ładunku fioletowego) kwark *u* w górnym wierszu zmieni się w antyelektron $e^c$ z wiersza piętnastego. (Znaki + oraz – oznaczają tak naprawdę *połowę* jednostki ładunku). W wyniku absorpcji tego samego bozonu kwark *d* z piątego wiersza zmieni się w antykwark *u* z wiersza dziewiątego. W Rejestrze Ładunków cząstki te różnią się jedynie przeciwnymi znakami + oraz – w pierwszej i ostatniej kolumnie. W wyniku emisji i absorpcji w postaci cząstki wirtualnej tego konkretnego bozonu zmieniającego kolor uzyskamy zatem proces:

$$u + d \rightarrow u^c + e^c$$

Teraz po obydwu stronach dodamy obserwujący to wszystko kwark *u*: $u + u + d \rightarrow u + u^c\ e^c$ i już prawie mamy to, o co nam chodzi. Musimy jeszcze jedynie zauważyć, że $u + u + d$ to składniki protonu oraz że $u + u^c$ mogą ze sobą anihilować, tworząc foton. Ostatecznie uzyskujemy proces rozpadu protonu

$$p \rightarrow \gamma + e^c$$

tak jak obiecywaliśmy.

# Dodatek C

# Od „pozbawionych błędów” modeli do (niemal) poprawnej idei

Savas Dimopoulos jest wiecznie czymś podekscytowany – wiosną 1981 roku była to supersymetria. Przyjechał wówczas do nowo powstałego Instytutu Fizyki Teoretycznej w Santa Barbara, w którym właśnie się zatrudniłem. Od razu się zaprzyjaźniliśmy – on rzucał szalone pomysły, jeden po drugim, a ja ćwiczyłem szare komórki, próbując brać niektóre z nich poważnie.

Supersymetria była (i wciąż jest) piękną matematyczną ideą. Problem z jej zastosowaniem polega na tym, że jest zbyt dobra dla naszego świata. Po prostu nie odkrywamy takich cząstek, jakie ona przewiduje. Nie udaje nam się na przykład zaobserwować cząstek z takim samym ładunkiem i masą jak elektrony, ale o innej wartości spinu.

Zasady symetrii, które mogą być pomocne w unifikacji fizyki cząstek elementarnych, są jednak trudnym do zdobycia towarem, dlatego fizycy teoretycy tak łatwo się nie poddają. Wykorzystując doświadczenie zdobyte z innymi formami symetrii, rozwinęliśmy strategię odwrotu, nazywaną spontanicznym łamaniem symetrii. W tym podejściu przyjmujemy, że podstawowe równania fizyki mają dane symetrie, natomiast stabilne rozwiązania tych równań – już nie. Klasyczny przykład tego zjawiska można zaobserwować w zwykłym magnesie. W podstawowych równaniach opisujących fizykę kawałka żelaza wszystkie kierunki są równorzędne, a jednak ów kawałek

metalu staje się magnesem, w którym istnieje wyraźny biegun północny.

Znanym, prostym przykładem spontanicznego łamania symetrii jest umowa społeczna o jeżdżeniu wybraną stroną drogi. Nie ma znaczenia, którą stroną jeżdżą ludzie, pod warunkiem wszakże, że wszyscy postępują tak samo. Gdyby niektórzy jeździli po prawej stronie, a inni po lewej, mielibyśmy do czynienia z sytuacją niestabilną. Dlatego symetria między prawą i lewą stroną musi ulec złamaniu. Oczywiście możliwe, że w różnych wszechświatach – nazwijmy je PL i GB – dokonano odmiennego wyboru.

W celu zbadania możliwości powstałych w wyniku spontanicznego złamania symetrii należy skonstruować model – sprowadza się to do twórczej pracy polegającej na proponowaniu konkretnych równań i analizowaniu wynikających z nich konsekwencji. Tworzenie modeli spontanicznego złamania symetrii, zgodnych ze wszystkim, co wiemy na temat fizyki, to bardzo trudne zajęcie. Nawet jeśli uda się doprowadzić do złamania symetrii, dodatkowe cząstki wciąż w modelu istnieją (są tylko cięższe) i powodują różne szkody. Przez krótki okres w połowie lat siedemdziesiątych XX wieku, gdy po raz pierwszy pojawiła się idea supersymetrii, próbowałem szczęścia w konstruowaniu modeli, ale poddałem się po kilku dotkliwych porażkach.

Savas miał naturalny dar tworzenia modeli i różnił się ode mnie pod dwoma istotnymi względami: nie starał się wszystkiego upraszczać i nigdy się nie poddawał. Gdy znajdowałem jakiś konkretny problem (nazwijmy go A), którego nie wyjaśniał jego obowiązujący w danym dniu model, mawiał: „To żadna przeszkoda, na pewno uda mi się to rozwiązać”. I nazajutrz po południu przychodził do mnie z bardziej rozbudowanym modelem, który wyjaśniał owo A. Wtedy jednak zaczynaliśmy omawiać problem B, z którym sobie radził, przedstawiając zupełnie inny, skomplikowany model. Aby poradzić sobie z A i B, należało połączyć ze sobą oba modele, i tak dochodziliśmy do problemu C i już po krótkim czasie wszystko zaczynało się strasznie komplikować. Analizując szczegóły, znajdowaliśmy zwykle w modelu jakąś usterkę. Następnego dnia Savas przychodził podekscytowany i szczęśliwy, przedstawiając

jeszcze bardziej złożony model, w którym skorygował znalezioną wczoraj usterkę. I tak ostatecznie usuwaliśmy wszystkie usterki, posługując się metodą przeprowadzania dowodu przez wyczerpanie – każdy, nie wyłączając nas, kto próbował przeanalizować model, opadał z sił, zanim zdołał go zrozumieć na tyle dobrze, by znaleźć w nim jakieś usterki.

Gdy próbowałem spisać nasze dzieło i przygotować je do publikacji, miałem pewne poczucie nierealności i zakłopotania związane z komplikacją i arbitralnością naszego modelu. Savasa to nie zrażało. Utrzymywał nawet, że pewne istniejące idee unifikacji wykorzystujące symetrię cechowania, które moim zdaniem były całkowicie prawdziwe, nie są wcale tak eleganckie, gdy próbuje się zachować pełny realizm i wyznaczyć wszystkie związane z nimi szczegóły. Rozmawiał nawet z innym fizykiem, Stuartem Rabym, o poprawieniu tych modeli przez dodanie do nich supersymetrii. Ja odnosiłem się niezwykle sceptycznie do pomysłu takiego „poprawiania", ponieważ byłem przekonany, że dodatkowa złożoność supersymetrii zniszczy uzyskane z takim trudem wyjaśnienie za pomocą symetrii cechowania względnych wartości stałych cechowania oddziaływania silnego, słabego i elektromagnetycznego. Postanowiliśmy w trójkę przeprowadzić odpowiednie obliczenia i przekonać się, czy to wszystko rzeczywiście tak kiepsko wygląda. Aby się jakoś w tym wszystkim odnaleźć i przeprowadzić konkretne rachunki, zaczęliśmy od najprostszego chwytu – całkowicie zignorowaliśmy cały problem łamania symetrii. To pozwoliło nam na wykorzystanie bardzo prostych (choć ewidentnie nierealistycznych) modeli.

Wynik tego ćwiczenia był zaskakujący, przynajmniej dla mnie. Supersymetryczne wersje modeli z symetrią cechowania, choć różniły się zasadniczo od oryginałów, dawały niemal takie same odpowiedzi w przypadku sprzężeń.

To był punkt zwrotny. Odłożyliśmy do szuflady poprzednie „pozbawione błędów" skomplikowane modele ze spontanicznym łamaniem symetrii i napisaliśmy krótki artykuł, który, jeśli rozumieć go dosłownie (z niezłamaną supersymetrią), był błędny. Przedstawiał jednak wynik tak naturalny i przekonujący, że za jego sprawą idea

połączenia unifikacji z supersymetrią zdawała się (niemal) poprawna. Problem procesu łamania supersymetrii odłożyliśmy na bok. Nawet obecnie, chociaż pojawiło się kilka ciekawych pomysłów, wciąż jeszcze nie mamy ogólnie przyjętego rozwiązania tego problemu.

Po opublikowaniu naszej pierwszej pracy dokładniejsze pomiary sprzężeń pozwoliły zweryfikować przewidywania modeli z supersymetrią i bez niej. Okazało się, że modele z supersymetrią działają lepiej. Wszyscy z niecierpliwością czekamy na wyniki eksperymentów realizowanych w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN – europejskim laboratorium fizyki cząstek – gdzie, jeśli te idee są poprawne, uczeni powinni wykryć nowe supersymetryczne cząstki – czy też, jak moglibyśmy powiedzieć, nowe wymiary superprzestrzeni.

Wydaje mi się, że ten niewielki epizod różni się w fazie o jakieś 179° od idei Karla Poppera, zgodnie z którą postępu w nauce dokonuje się przez falsyfikację teorii. Przeciwnie, w wielu przypadkach, włącznie z niektórymi najważniejszymi, uświadamiamy sobie nagle, że jeśli strategicznie zignorujemy palące problemy, będziemy mogli przyjąć, iż nasze teorie mogą być prawdziwe. Podobny punkt zwrotny nastąpił, gdy razem z Davidem Grossem postanowiliśmy oprzeć chromodynamikę kwantową (QCD) na swobodzie asymptotycznej, pomijając problem uwięzienia kwarków. Ale to już inna historia…

# Słownik

**aksjon**

Hipotetyczna cząstka przewidywana przez klasę teorii usuwających pewną usterkę w teorii Rdzenia (chodzi o problem łamania symetrii CP w przypadku oddziaływania silnego). Aksjony powinny bardzo słabo oddziaływać ze zwykłą materią. Obliczenia wskazują, że w czasie Wielkiego Wybuchu mogło ich powstać mniej więcej tyle, ile potrzeba do wyjaśnienia ciemnej materii – są więc dobrymi kandydatami do roli cząstek ciemnej materii.

**amplituda (kwantowa)**

Mechanika kwantowa podaje przewidywane prawdopodobieństwa zajścia różnych zdarzeń, ale w jej równaniach wykorzystuje się *amplitudy* będące swego rodzaju preprawdopodobieństwem. Dokładniej rzecz biorąc, prawdopodobieństwo jest kwadratem amplitudy. (Dla znawców tematu: w ogólności amplitudy są liczbami zespolonymi, a prawdopodobieństwa kwadratami ich modułów). Określenia *amplituda* używa się do opisu wysokości różnego rodzaju fal, na przykład fal morskich, dźwiękowych czy radiowych. Amplitudy kwantowomechaniczne są w zasadzie wysokością kwantowomechanicznych funkcji falowych. Więcej informacji na ten temat i odpowiednie przykłady można znaleźć w rozdziale dziewiątym. [*Zob. także:* funkcja falowa].

**antycząstka**

Antycząstka danej cząstki ma taką samą jak ona masę i spin, ale przeciwną wartość ładunku i innych wielkości podlegających zasadzie zachowania. Jako pierwsze w historii odkryto antyelektrony,

nazywane również pozytonami. Ich istnienie Paul Dirac przewidział najpierw teoretycznie, a dopiero później Carl Anderson zaobserwował je w promieniach kosmicznych. Ważną konsekwencją kwantowej teorii pola jest to, że każdemu rodzajowi cząstki odpowiada antycząstka. Foton jest swoją antycząstką; to możliwe dlatego, że jest on elektrycznie obojętny. W przypadku par cząstka-antycząstka wszystkie liczby kwantowe podlegające zasadom zachowania mogą mieć wartość zero, dlatego pary takie mogą powstawać z czystej energii, a także pojawiać się samoistnie jako fluktuacje kwantowe (pary wirtualne).

**antyekranowanie**

Przeciwieństwo ekranowania. [*Zob.*: ekranowanie]. Podczas gdy ekranowanie zmniejsza rzeczywistą siłę danego ładunku elektrycznego, antyekranowanie zwiększa wpływ ładunku koloru. Za sprawą antyekranowania zatem słaby zarodkowy ładunek koloru staje się w dużej odległości silny. Antyekranowanie ładunku koloru jest istotą swobody asymptotycznej, kluczowej cechy QCD. [*Zob. także*: ładunek koloru, QCD].

**antymateria**

Materia, z którą się na co dzień stykamy – i z której sami jesteśmy zbudowani – składa się z elektronów, kwarków, fotonów i gluonów. Materię składającą się z odpowiadających im antycząstek – czyli antyelektronów (zwanych też pozytonami), antykwarków, fotonów i gluonów – nazywa się często antymaterią. (Zwróćcie uwagę, że fotony i gluony są swoimi antycząstkami. Dokładniej rzecz biorąc, niektóre gluony są antycząstkami innych gluonów; cała ósemka gluonów tworzy kompletny zestaw, który przekształca się sam w siebie podczas tworzenia poszczególnych antycząstek). [*Zob. także*: antycząstka].

**barion**

Jeden z dwóch schematów budowy cząstek podatnych na wpływ oddziaływania silnego (hadronów). W przybliżeniu można przyjąć,

że bariony są tworzone przez trzy kwarki. Mówiąc dokładniej, są one wynikiem osiągnięcia stanu równowagi przez trzy kwarki i Siatkę. Pełna funkcja falowa barionu zawiera, oprócz trzech kwarków, również dowolną liczbę par kwark-antykwark i gluonów. Barionami są protony i neutrony, podstawowe składniki jąder atomowych. [*Zob. także*: hadron].

**bozon**

Teoria kwantowa, a w szczególności kwantowa teoria pola, zupełnie na nowo definiuje, co to znaczy, że dwa obiekty są dokładnie takie same, nierozróżnialne. Gdybyśmy mieli, powiedzmy, dwa fotony, które w danym momencie były w stanach A i B, oraz chwilę później dwa fotony w stanach A′ i B′, nie moglibyśmy stwierdzić, czy zaszło przejście A ⟶ A′, B ⟶ B′, czy też A ⟶ B′, B ⟶ A′. Należy dopuścić obydwie możliwości. W przypadku bozonów należy zsumować ich amplitudy, w przypadku fermionów – odjąć. Fotony są bozonami. Konsekwencją tego jest fakt, że fotony lubią przyjmować taki sam stan, ponieważ wtedy amplitudy przejścia ulegają podwojeniu. Efekt ten wykorzystują lasery. Oprócz fotonów bozonami są gluony, wuony oraz zetony, a także mezony i hipotetyczne cząstki Higgsa. Zwykło się mówić, że bozony obowiązuje statystyka Bosego (lub Bosego–Einsteina), nazwana tak od nazwiska jednego z pionierów fizyki, który wyjaśnił znaczenie tego zachowania w układach zawierających wiele identycznych cząstek.

**chromodynamika**

Teoria opisująca oddziaływania pól gluonowych, włącznie z ich reakcją na ładunki koloru i prądy (przepływy ładunków). Jest to powszechnie przyjęta teoria oddziaływania silnego. Z matematycznego punktu widzenia chromodynamika jest uogólnieniem elektrodynamiki. Ponieważ we wszystkich zastosowaniach chromodynamiki ważną rolę odgrywa teoria kwantowa, często nazywa się ją chromodynamiką kwantową,

w skrócie QCD, od ang. *quantum chromodynamics*. [*Zob. także*: oddziaływanie silne].

**ciemna energia**

Obserwacje astronomiczne wskazują, że olbrzymia część masy Wszechświata, około 70% jej wartości, ma równomierny rozkład i jest niemal doskonale przezroczysta. Z innych, niezależnych obserwacji wynika, że tempo ekspansji Wszechświata zwiększa się, co można wytłumaczyć ujemnym ciśnieniem. Wielkości i względne znaki tych efektów zgadzają się z dobrze nastrojonym równaniem. Przeprowadzone dotąd obserwacje można opisać, posługując się członem kosmologicznym. Jest jednak logicznie możliwe, że w przyszłości odkryjemy, iż gęstość i/lub ciśnienie nie są stałe albo że ich wartości nie są skorelowane ze sobą zgodnie z dobrze nastrojonym równaniem. Aby uniknąć wydawania pochopnego osądu w tej kwestii, wprowadzono nazwę „ciemna energia".

**ciemna materia**

Z obserwacji astronomicznych wynika, że duża część masy Wszechświata, około 25% jej wartości, ma rozkład dużo bardziej rozproszony niż zwykła materia i jest niemal doskonale przezroczysta. Zbudowane ze zwykłej materii galaktyki otacza rozległe halo ciemnej materii. W sumie halo to waży około pięciu razy więcej niż widoczna w obserwacjach galaktyka. Nie wyklucza się również istnienia niezależnych skupisk ciemnej materii. Interesującymi kandydatami na składniki ciemnej materii są słabo oddziałujące masywne cząstki (w skrócie WIMP, od ang. *weakly interacting massive particle*), związane z supersymetrią, oraz aksjony. [*Zob. także*: aksjony, supersymetria].

**cząstka**

Lokalne zaburzenie w Siatce.

**cząstka Higgsa**

Wzbudzenie (jak dotąd hipotetycznego) pola powodującego, że pusta przestrzeń staje się nadprzewodnikiem dla oddziaływania słabego.

**cząstka wirtualna**

Samoistna fluktuacja pola kwantowego. Rzeczywiste cząstki są wzbudzeniami pól kwantowych o dosyć użytecznym, wysokim stopniu trwałości i dzięki temu można je zaobserwować. Cząstki wirtualne są ulotne, pojawiają się wyłącznie w równaniach – detektory nie wykrywają ich w czasie doświadczeń. Jeżeli dostarczy się odpowiednio dużo energii, można wzmocnić samoistne fluktuacje do wartości przewyższającej pewien próg – efekt ten powoduje, że cząstki wirtualne (które inaczej pozostałyby takie) stają się cząstkami rzeczywistymi.

**człon kosmologiczny**

Logiczne rozszerzenie równań ogólnej teorii względności. Używając terminologii geometrycznej, powiemy, że człon kosmologiczny wzmacnia (zależnie od swego znaku) albo jednorodne rozszerzanie się, albo kurczenie czasoprzestrzeni. Można też interpretować ten człon jako wpływ stałej gęstości energii (dodatniej lub ujemnej) na pole metryczne. Tej gęstości $\rho$ towarzyszy ciśnienie $p$ powiązane z nią „dobrze nastrojonym równaniem”: $\rho = -p/c^2$.

**diagram Feynmana**

Diagramy Feynmana są skrótowym, graficznym przedstawieniem procesów opisywanych przez kwantową teorię pola. Składają się z linii połączonych ze sobą w wierzchołkach (zwanymi również węzłami). Linie symbolizują swobodne przemieszczanie się cząstki w czasoprzestrzeni; wierzchołki odpowiadają oddziaływaniom. Przy takiej interpretacji diagram Feynmana przedstawia proces, który może zajść w czasoprzestrzeni: jakieś (rzeczywiste lub wirtualne) cząstki oddziałują, w wyniku czego zmianie może ulec ich stan kwantowy. Istnieją precyzyjne reguły mówiące, jak procesowi przedstawionemu na diagramie przypisać amplitudy prawdopodobieństwa. Zgodnie z zasadami teorii kwantowej

prawdopodobieństwem zajścia danego procesu jest kwadrat amplitudy.

**dobrze nastrojone równanie**

$\rho = -p/c^2$. [*Zob. także*: ciemna energia, człon kosmologiczny].

**dylatacja czasu**

Efekt, który powoduje, że czas płynie wolniej w poruszającym się układzie obserwowanym z zewnątrz. Dylatacja czasu jest konsekwencją szczególnej teorii względności.

**dżet**

Wyraźnie odróżnialna grupa cząstek poruszających się niemal w tym samym kierunku. Dżety cząstek pojawiają się często w wyniku wysokoenergetycznych zderzeń w akceleratorach. Swoboda asymptotyczna pozwala nam interpretować dżety jako widoczny przejaw istnienia kwarków, antykwarków i gluonów powodujących powstanie takiego zjawiska.

**ekranowanie**

Ładunek dodatni przyciąga ładunki ujemne, które go równoważą (ekranują). Zatem pełną siłę ładunku dodatniego można odczuć jedynie w jego pobliżu; w dużej odległości jego wpływ ulega zmniejszeniu za sprawą nagromadzonych ładunków ujemnych. Ekranowanie jest bardzo istotne w pracach teoretycznych dotyczących metali, czyli pierwiastków zawierających swobodne elektrony. Zjawisko to jest również ważne dla „pustej przestrzeni", czyli dla Siatki. W tym przypadku ładunki ujemne dostarczane są przez cząstki wirtualne. Chociaż poszczególne cząstki wirtualne pojawiają się i znikają, ich całkowita populacja utrzymuje się na stałym poziomie i powoduje, że Siatka jest dynamicznym ośrodkiem. [*Zob. także*: antyekranowanie, cząstka wirtualna, Siatka].

**elektrodynamika**

Teoria opisująca działanie pól elektrycznych i magnetycznych, w tym ich reakcje na ładunki i prądy (przepływy ładunku). Można również ją rozumieć jako teorię pola fotonowego. Obecnie wiemy, że światło we wszystkich swoich postaciach, wraz z (na przykład) falami radiowymi i promieniami rentgenowskimi, powstaje w wyniku aktywności pól elektrycznych i magnetycznych. Podstawowe równania elektrodynamiki odkrył Maxwell, a następnie zostały one udoskonalone przez Lorentza. [*Zob. również*: ładunek, równania Maxwella].

**elektron**

Podstawowy składnik materii. Elektrony są w zwykłej materii nośnikiem wszystkich ujemnych ładunków. Zajmują lwią część objętości atomów, na zewnątrz ich niewielkich jąder. W porównaniu z jądrami elektrony są bardzo lekkie i ruchliwe, dlatego też są aktywnymi uczestnikami większości procesów chemicznych i oczywiście elektronicznych.

**energia**

Kluczowe pojęcie w fizyce. To zadziwiające, biorąc pod uwagę jego znaczenie, że definicja energii wydaje się na pierwszy rzut oka tak subtelna i nieciekawa. Co więcej, dopiero w połowie XIX stulecia zaczęło się krystalizować współczesne pojęcie energii i zasady jej zachowania. Najbardziej oczywistą jej formą jest energia kinetyczna, czyli związana z ruchem. (W mechanice przedrelatywistycznej wartość energii kinetycznej ciała wyznaczano, mnożąc jego masę przez kwadrat prędkości. Wzory relatywistyczne, uwzględniającą energię w stanie spoczynku, omówiono w dodatku A). Energia kinetyczna ciała najczęściej zmienia się pod wpływem działania sił, jednak w przypadku niektórych oddziaływań (tak zwanych sił zachowawczych) można zdefiniować funkcję energii potencjalnej, zależnej jedynie od położenia ciała, tak że całkowita wartość energii kinetycznej i potencjalnej pozostaje stała. Mówiąc ogólniej, w przypadku układu ciał i pewnej klasy sił suma wszystkich ich energii kinetycznych i potencjalnych, zależnych jedynie od ich

położenia, jest zachowana. Pierwsza zasada termodynamiki mówi, że energia jest zachowana, chociaż może się ukrywać w formie ciepła, które jest przejawem trudnego do zaobserwowania, odbywającego się na bardzo małych odległościach ruchu wewnątrz ciał. Z tego wynika, iż zasada ta zakłada, że podstawowe siły przyrody muszą zawsze być zachowawcze. Tę śmiałą hipotezę, wysuniętą na długo przed wyjaśnieniem natury sił elementarnych, usprawiedliwia sukces termodynamiki. [*Zob. także*: reguła jezuitów].

We współczesnych teoriach fizycznych energia jest pojęciem pierwotnym, na równi z czasem, z którym jest głęboko związana. Na przykład czas *T* potrzebny na to, by drgające elektryczne zaburzenia wewnątrz fotonu przeszły przez jeden pełny cykl, jest związany z energią fotonu *E* wzorem *ET* = *h*, gdzie *h* jest stałą Plancka. W ramach tych teorii zasada zachowania energii jest konsekwencją symetrii równań ze względu na przesunięcie w czasie – czy też, innymi słowy, faktu, że prawa nie zmieniają się w czasie.

Moglibyśmy się zastanawiać: skoro podstawowe prawa fizyki zapewniają zachowanie energii, skąd to ciągłe nawoływanie do podjęcia działań mających na celu oszczędzanie energii? W końcu prawa fizyki powinny działać bez pomocy z zewnątrz! Chodzi o to, że niektóre postacie energii są bardziej użyteczne od innych; w szczególności przypadkowe drgania (ciepło) nie dają się łatwo zaprząc do wykonania użytecznej pracy. Z punktu widzenia fizyki powinniśmy raczej apelować o zmniejszenie produkcji entropii. [*Zob. także:* entropia].

**entropia**

Miara nieporządku. [Więcej informacji można znaleźć w książkach poświęconych termodynamice lub w artykułach w Wikipedii].

**eter**

Substancja wypełniająca przestrzeń. Zanim fizycy oswoili się z pojęciem pól jako podstawowych składników rzeczywistości, próbowali konstruować mechaniczne modele pól elektrycznych i magnetycznych. Wysuwali hipotezy, że pola są przejawem

konfiguracji bardziej podstawowych, cząstkowych obiektów, tak jak gęstość i pola pływowe cieczy są przejawem rozmieszczenia atomów i zmiany ich ułożeń. Modele takie bardzo się komplikowały i nigdy dobrze nie działały, dlatego pojęcie „eteru" zaczęło się źle kojarzyć. We współczesnej fizyce jednak pojęcie medium wypełniającego przestrzeń jest podstawowym obrazem rzeczywistości. Medium to ma zupełnie inne własności niż klasyczny eter, dlatego nadałem mu nową nazwę: Siatka.

**fermion**

Teoria kwantowa, a w szczególności kwantowa teoria pola, zupełnie na nowo definiuje, co to znaczy, że dwa obiekty są takie same, nierozróżnialne. Gdybyśmy mieli, powiedzmy, dwa elektrony, które w danym momencie były w stanach A i B, oraz chwilę później dwa elektrony w stanach A′ i B′, nie moglibyśmy stwierdzić, czy zaszło przejście $A \longrightarrow A'$, $B \longrightarrow B'$, czy też $A \longrightarrow B'$, $B \longrightarrow A'$. Należy dopuścić obydwie możliwości. W przypadku bozonów należy zsumować ich amplitudy, w przypadku fermionów – odjąć. Elektrony są fermionami. Zgodnie z zakazem Pauliego dwa elektrony nie mogą być w tym samym stanie, gdyż w takim wypadku ich amplitudy całkowicie się wzajemnie znoszą. W wyniku obowiązywania zakazu Pauliego elektrony wzajemnie się odpychają (chodzi o kwantowe odpychanie wynikające z prawdopodobieństwa), czego efektem jest fakt, że w atomie różne elektrony muszą zajmować różne stany i w dużej mierze dzięki temu chemia jest tak bogatą i skomplikowaną nauką. Nie tylko elektrony są fermionami, są nimi także wszystkie leptony, kwarki i ich antycząstki. Podobnie protony i neutrony – głównie dlatego chemia *jądrowa* jest tak bogatą i skomplikowaną dziedziną. Zwykło się mówić, że fermiony obowiązuje statystyka Fermiego lub Fermiego–Diraca, nazwana tak na cześć fizyków, który prowadzili pionierskie prace wyjaśniające konsekwencje takiego zachowania dla układów zawierających wiele identycznych cząstek.

**foton**

Minimalne wzbudzenie pola elektromagnetycznego. Foton jest najmniejszą jednostką światła, czasami zwaną kwantem światła. (A tak przy okazji, skok kwantowy to bardzo *mały* skok).

**funkcja falowa**

W teorii kwantowej stanu cząstki nie określa jej położenie ani określony kierunek spinu; zamiast tego jej stan opisuje funkcja falowa. Funkcja falowa każdemu możliwemu położeniu cząstki i kierunkowi jej spinu przypisuje pewną liczbę zespoloną, tak zwaną amplitudę prawdopodobieństwa. Kwadrat amplitudy prawdopodobieństwa (jego wartość bezwzględna) jest prawdopodobieństwem znalezienia cząstki w danym położeniu i z określonym kierunkiem spinu. W przypadku układów wielu cząstek lub pól funkcja falowa podobnie określa amplitudy wszystkich możliwych stanów fizycznych, które można zaobserwować w czasie wykonywania pomiaru. Prosty (ale nie przesadnie) przykład działania funkcji falowej omówiono w rozdziale dziewiątym.

**gluon**

Jedna ze zbioru ośmiu cząstek pośredniczących w oddziaływaniu silnym. Gluony mają własności podobne do fotonów, reagują jednak na ładunki koloru (i je zmieniają), a nie na ładunki elektryczne. Równania gluonów wykazują olbrzymią symetrię lokalną, która w dużej mierze decyduje o ich postaci. [*Zob. także*: chromodynamika, symetria lokalna, równania Yanga–Millsa].

**hadron**

Cząstka fizyczna zbudowana z kwarków i gluonów. (Kwarki i gluony same się nie liczą, ponieważ nie mogą występować pojedynczo). Odkryto dwa podstawowe typy hadronów: mezony i bariony. Mezony powstają, gdy pozwoli się kwarkowi i antykwarkowi uzyskać stan równowagi z Siatką. Bariony powstają, gdy stan równowagi z Siatką osiągną trzy kwarki. Zaobserwowano wiele dziesiątków różnych mezonów i barionów. Prawie wszystkie są bardzo nietrwałe. Mogą istnieć również „kule gluonowe”, zbudowane z dwóch lub trzech

gluonów. Trwają spory, czy kule gluonowe rzeczywiście udało się zaobserwować – odkrywane przez nas cząstki nie mają plakietek z nazwami!

**hiperładunek**

Wypadkowy ładunek elektryczny kilku cząstek powiązanych ze sobą symetrią. W kontekście zunifikowanych teorii hiperładunek jest bardziej podstawowy niż ładunek elektryczny; różnica staje się jednak widoczna na dużo głębszym poziomie rozumienia fizyki niż poziom szczegółowości przyjęty w przeważającej części niniejszej książki.

**jądro atomowe**

Niewielka środkowa część atomu, w której zawiera się cały jego ładunek dodatni i niemal cała masa.

**jednostki Plancka**

Jednostki długości, masy i czasu wyprowadzone z wartości wielkości pojawiających się w równaniach fizycznych, nieodwołujące się do żadnych konkretnych obiektów. Dzięki temu nie jest nam potrzebny żaden wzorzec metra (czy długość królewskiej kończyny) do porównywania długości, ani obracająca się Ziemia do ustalenia jednostki czasu, ani też wzorzec kilograma. Zamiast tego jednostki Plancka konstruuje się, podnosząc do odpowiednich potęg prędkość światła *c*, stałą Plancka *h* oraz newtonowską stałą grawitacji *G*, pojawiającą się w równaniach prawa ciążenia, oraz wyciągając z nich pierwiastki. Jednostkami Plancka trudno się posługiwać w praktyce: tak zdefiniowane jednostki długości i czasu są absurdalnie małe, natomiast masa Plancka jest niedorzecznie duża w skali atomowej, a niewygodnie mała w naszej, ludzkiej skali. Jednostki te mają jednak duże znaczenie teoretyczne. Stawiają przed nami wyzwanie *wyliczenia* takich czysto liczbowych wielkości jak masa protonu w jednostkach Plancka (natomiast zupełnie nie jest możliwe wyliczenie masy protonu w kilogramach, dlatego mówimy,

że wyznaczenie masy protonu w kilogramach jest źle postawionym problemem).

Jeśli ekstrapolujemy prawa fizyki daleko poza granice, w ramach których je sprawdzono, przekonamy się, że w polu metrycznym na odległościach i w skalach czasowych mniejszych od długości i czasu Plancka fluktuacje kwantowe zaczynają odgrywać tak istotną rolę, iż praktyczne znaczenie odległości i czasu staje się niejasne. Jak mówiliśmy w tej książce, istnieją ważne wskazówki przemawiające za tym, że gdy różne siły przyrody mierzymy w jednostkach Plancka i w skali odległości Plancka, dochodzi do ich unifikacji – w szczególności siły ich oddziaływań stają się sobie równe.

**kolor**

1. Elementarna cecha fizyczna, analogiczna do ładunku elektrycznego, choć różniąca się od niego. Istnieją trzy rodzaje ładunku koloru, które w niniejszej książce określiliśmy nazwami: czerwony, biały i niebieski. Każdy kwark jest obdarzony jednostką jednego z tych ładunków koloru. Gluony mają zarówno dodatnią, jak i ujemną jednostkę ładunku koloru, z tym że obie jednostki mogą być różnych kolorów. 2. Na co dzień pojęcie „kolor" oznacza oczywiście zupełnie coś innego, mianowicie kolor jest częstotliwością promieniowania elektromagnetycznego, gdy zawiera się ona w wąskim zakresie odpowiadającym największemu natężeniu promieniowania słonecznego. To był żart – do pewnego stopnia. Tak naprawdę codzienne znaczenie określenia *kolor* ma pozanaukowe korzenie. Odwołuje się do tego, jak nasze oczy i mózg reagują na takie właśnie promieniowanie elektromagnetyczne. [*Zob. także*: chromodynamika, ładunek].

**kwarki**

Razem z gluonami biorą udział w oddziaływaniu silnym (aspekt doświadczalny) lub, co równoważne, są podstawą QCD (aspekt teoretyczny). Są fermionami o spinie ½. Istnieją trzy różne zapachy kwarków *U* – kwarki: *u* (górny), *c* (powabny) oraz *t* (wysoki) – wszystkie one mają taki sam ładunek elektryczny 2*e*/3 i jedną

jednostkę ładunku koloru (czerwonego, białego lub niebieskiego); dodatkowo istnieją trzy zapachy kwarków *D* – kwarki: *d* (dolny), *s* (dziwny) oraz *b* (niski) – występujące również w trzech kolorach, o ładunku elektrycznym $-e/3$. Procesy związane z oddziaływaniem słabym mogą przekształcać wzajemnie w siebie różne zapachy. Zatem gluony zmieniają ładunek koloru kwarka, ale nie jego zapach, natomiast wuony zmieniają zapach, ale nie kolor. Nie można zaobserwować bezpośrednio pojedynczych kwarków, ale pozostawiają one po sobie charakterystyczne ślady w postaci dżetów (aspekt doświadczalny) i wykorzystuje się je także do konstruowania obserwowanych hadronów (aspekt teoretyczny). Wszystkie oddziaływania Rdzenia zachowują całkowitą liczbę kwarków pomniejszoną o liczbę antykwarków. Ta „zasada zachowania liczby barionowej" zapewnia trwałość protonu. Zunifikowane teorie w większości przewidują istnienie oddziaływań zmieniających kwarki w leptony i mogących prowadzić do rozpadu protonów. Jak dotąd takiego rozpadu nie udało się zaobserwować. [*Zob. także*: wszystkie podkreślone wyrażenia].

**LEP**

Skrót od ang. *Large Electron-Positron collider* – Wielki Zderzacz Elektronowo-Pozytonowy. LEP działał w latach dziewięćdziesiątych XX wieku w wielkim europejskim laboratorium CERN w pobliżu Genewy. W przybliżeniu robił on zdjęcia pustej przestrzeni z rozdzielczością wyższą nawet niż SLAC. Aby to osiągnąć, przyspieszano elektrony i ich antycząstki (pozytony) do olbrzymich energii, a następnie doprowadzano do ich anihilacji, wytwarzając w ten sposób intensywny rozbłysk energii w niezwykle małej objętości. LEP był maszyną do twórczej destrukcji. Przeprowadzone w LEP doświadczenia sprawdziły i określiły teorię Rdzenia z niezwykłą dokładnością liczbową. [*Zob. także*: SLAC].

**lepton**

Jedna z cząstek grupy zawierającej *e* (elektrony), *μ* (miony), *τ* (taony) i ich neutrina. Cząstki te mają zerowy ładunek koloru. *e*, *μ*

oraz $\tau$ są obdarzone takim samym ładunkiem elektrycznym: $-e$. (Tak, wiem, że używam tego samego symbolu na oznaczenie różnych zjawisk. Bardzo mi przykro, ale jeśli się nad tym zastanowić, to w przypadku liter często tak właśnie bywa). Neutrina mają zerowy ładunek elektryczny. Wszystkie te cząstki biorą udział w oddziaływaniach słabych.

Istnieją bardzo dobre (ale nie doskonałe) zasady zachowania stwierdzające, że całkowita liczba elektronów-antyelektronów plus całkowita liczba elektronowych neutrin-antyneutrin jest niezmienna w czasie (nawet jeśli poszczególne wartości składowe się zmieniają) – i podobnie w przypadku mionów i taonów. Na przykład produktem końcowym rozpadu mionu są: elektron, neutrino mionowe i antyneutrino elektronowe. Zarówno na początku, jak i na końcu procesu liczba mionowa jest równa jeden, a liczba elektronowa – zero. Z tych „zasad zachowania liczby leptonowej" wyłamuje się zjawisko oscylacji neutrin. Niewielkie odchylenia od zasady zachowania liczby leptonowej przewidziały teorie zunifikowane. Zaobserwowanie tego zjawiska pozwala nam mieć nadzieję, że teorie te są na dobrej drodze. [*Zob. również*: neutrino].

**LHC**

Skrót od ang. *Large Hadron Collider* – Wielki Zderzacz Hadronów. LHC zajmuje w CERN tunel, w którym kiedyś znajdował się akcelerator LEP. Zamiast elektronów i pozytonów wykorzystuje się w nim protony, uzyskuje się również wyższe energie niż w LEP. Byłoby dziwne, gdyby w LHC nie dokonano żadnych odkryć. Powinniśmy się przynajmniej dowiedzieć, co powoduje, że Siatka jest egzotycznym nadprzewodnikiem.

**ładunek**

W elektrodynamice ładunek jest cechą fizyczną, na którą reagują pola elektryczne i magnetyczne. (Pola magnetyczne reagują jedynie na poruszające się ładunki). W wersji kwantowej, QED, możemy powiedzieć po prostu, że ładunek jest tym czymś, co interesuje fotony. Ładunek może być albo dodatni, albo ujemny. Cząstki

obdarzone ładunkiem o takim samym znaku (dodatnim bądź ujemnym) odpychają się, natomiast cząstki z ładunkami o znakach przeciwnych – przyciągają. Ważną cechą ładunku jest to, że jest on zachowywany. Każdy typ cząstek elementarnych jest obdarzony określoną ilością ładunku – może być zerowa – i wartość ta stanowi stałą cechę tego typu cząstek. Wszystkie elektrony na przykład mają taką samą ilość ładunku, którą zwykle oznacza się: *–e*. (Niektórzy autorzy używają symbolu: *e*, bez znaku minus, co może prowadzić do nieporozumień. O ile mi wiadomo, w tym zakresie nie istnieje żaden powszechnie przyjęty zwyczaj stosowania oznaczeń). Protony mają ładunek *e*, przeciwny do elektronów. Całkowity ładunek układu jest zwykłą sumą ładunków wszystkich jego elementów. Atomy, zawierające równą liczbę protonów i elektronów, mają zatem zerowy ładunek całkowity. W teorii oddziaływania silnego główną rolę odgrywają trzy dodatkowe rodzaje ładunków nazywane **ładunkami koloru** lub po prostu kolorami. Ładunki koloru mają własności podobne do ładunku elektrycznego; na przykład stosuje się do nich zasada zachowania ładunku. W teorii QCD ładunek koloru jest tym czymś, co interesuje gluony. [*Zob. także*: chromodynamika, elektrodynamika, kolor, pole].

**ładunek bez ładunku**

Pojęciowa konsekwencja swobody asymptotycznej. Efektywny ładunek koloru danego źródła maleje na niewielkich odległościach. Niezerowa, skończona wartość ładunku na niezerowej odległości odpowiada zerowemu ładunkowi w matematycznej granicy odległości zdążającej do zera. W ten sposób źródło punktowe wytwarza ładunek bez ładunku. Wyczyn godny kota z Cheshire.

**łącznik**

[*Zob.*: wierzchołek].

**masa**

Własność cząstki bądź układu fizycznego będąca miarą jego bezwładności (to znaczy, masa cząstki mówi nam, jak trudno jest

zmienić jej prędkość). Przez całe stulecia uczeni sądzili, że obowiązuje prawo zachowania masy, ale obecnie wiemy, że tak nie jest.

**masa bez masy**

Idea, urzeczywistniona we współczesnej fizyce, zgodnie z którą z elementów pozbawionych masy mogą powstać obiekty o niezerowej masie.

**mezon**

Typ cząstki reagującej na oddziaływanie silne, czyli jeden z hadronów. [*Zob. także*: hadron].

**Model Standardowy**

Określenie wymyślone w celu nadania nudnej nazwy jednemu z największych osiągnięć umysłu w historii ludzkości. Czasem używane na oznaczenie jedynie elektrosłabej części teorii Rdzenia, a czasem oznacza zarówno teorię elektrosłabą, jak i QCD.

**nadprzewodnik**

Niektóre materiały schłodzone do bardzo niskiej temperatury przechodzą w stan, w którym w ich reakcjach na pola elektryczne i magnetyczne pojawiają się zupełnie nowe jakościowo cechy. Znika ich opór elektryczny i w dużym stopniu wypychają one – to znaczy, równoważą – zewnętrzne pola magnetyczne (jest to efekt Meissnera). Mówimy, że stają się nadprzewodnikami. Analiza właściwości elektromagnetycznych nadprzewodników za pomocą technik matematycznych pokazuje, że w ich wnętrzu fotony uzyskują niezerową masę.

Chociaż wuony i zetony pod wieloma względami przypominają fotony – są bozonami o spinie 1, reagują na ładunki (koloru oddziaływania słabego) – to jednak mają niezerowe masy. Na pierwszy rzut oka fakt ten powinien wykluczać atrakcyjną pod każdym innym względem ideę, że wuonami i zetonami, tak jak fotonami, rządzą równania posiadające symetrię lokalną.

Nadprzewodnictwo pokazuje, jak można z tego wybrnąć. Przyjmując, że przestrzeń jest nadprzewodnikiem, nie dla ładunku elektrycznego, ale dla ładunków, na które reagują wuony i zetony, nadajemy tym cząstkom niezerową masę, zachowując jednocześnie lokalną symetrię opisujących je równań. Tak wygląda główna idea współczesnej teorii elektrosłabej i wydaje się, że bardzo dobrze opisuje ona Przyrodę. Bardziej hipotetyczne pomysły zakładają istnienie w Siatce dodatkowej warstwy nadprzewodnictwa nadającej olbrzymie masy cząstkom pośredniczącym w przekształceniach kwark-lepton.

**neutrino**

Typ cząstki elementarnej niemającej ani ładunku elektrycznego, ani koloru. Neutrina są fermionami o spinie ½. Występują w trzech różnych rodzajach, zwanych zapachami, związanych z trzema zapachami leptonów obdarzonych ładunkiem (elektronów *e*, mionów *μ* oraz taonów *τ*). W procesach związanych z oddziaływaniem słabym naładowane leptony i ich antycząstki mogą się przekształcać w neutrina i ich antycząstki, jednak zawsze w taki sposób, aby liczba leptonowa była zachowana. [*Zob. także*: leptony]. Słońce emituje neutrina w dużej obfitości, ale cząstki te oddziałują tak słabo, że prawie wszystkie przechodzą swobodnie przez Słońce (nie mówiąc już o Ziemi), jeśli stanie ono na ich drodze. Niemniej zdarza się, że oddziałują z materią i w żmudnych doświadczeniach udało się wykryć kilka takich cząstek. Niedawno ustalono, że przemierzając olbrzymie odległości, neutrina przechodzą z jednej postaci w drugą (neutrino elektronowe może na przykład przekształcić się w neutrino mionowe). Oscylacje takie stanowią pogwałcenie zasady zachowania liczby leptonowej. Samo istnienie tego zjawiska i jego przybliżona wielkość są zgodne z oczekiwaniami teorii zunifikowanych.

**neutron**

Łatwo identyfikowalna kombinacja kwarków i gluonów, istotny składnik zwykłej materii. Pojedyncze neutrony są nietrwałe: ich średni czas życia wynosi około 15 minut; rozpadają się na proton,

elektron i antyneutrino elektronowe. Jednak neutrony związane w jądrach atomowych są stabilne. [*Por. z hasłem*: proton].

**oddziaływanie silne**

Jedno z czterech podstawowych oddziaływań. Wiąże ze sobą kwarki i gluony, tworząc protony, neutrony i inne hadrony, a także skupia ze sobą protony i neutrony, tak że tworzą jądra atomowe. Większość zjawisk obserwowanych w akceleratorach o wysokich energiach jest efektem działania oddziaływania silnego.

**oddziaływanie słabe**

Razem z grawitacją, elektromagnetyzmem i oddziaływaniem silnym jedno z podstawowych oddziaływań w Przyrodzie. Najważniejszym efektem jego działania są przekształcenia między sobą różnych rodzajów kwarków i leptonów (ale nie kwarków w leptony i na odwrót – takie hipotetyczne przekształcenia kwark-lepton pojawiają się jedynie w teoriach zunifikowanych). Właśnie dzięki niemu dochodzi do wielu rozpadów radioaktywnych i niektórych kluczowych reakcji w procesie spalania zachodzącym we wnętrzach gwiazd.

**ogólna teoria względności**

Einsteinowska teoria grawitacji oparta na pojęciu zakrzywienia czasoprzestrzeni lub, alternatywnie, na polu metrycznym. W przypadku sformułowania tej teorii za pomocą pola w ogólnych zarysach przypomina ona elektromagnetyzm. Elektromagnetyzm zasadza się jednak na reakcji pól elektrycznych i magnetycznych na ładunki i prądy, ogólna teoria względności zaś opiera się na reakcji pola metrycznego na energię i pęd. [*Zob. także*: pole metryczne].

**pchnięcie**

Przekształcenie powodujące, że układ fizyczny, wraz ze wszystkimi swoimi składnikami, porusza się ze stałą prędkością. Zgodnie ze współczesnym poglądem na szczególną teorię względności jedną

z jej istotnych cech jest *symetria „pchnięcia”*. Oznacza to, że prawa fizyki nie powinny się zmieniać na skutek nadania układowi stałej prędkości. Wynika stąd, że badając zjawiska fizyczne w zamkniętym, odizolowanym układzie, nie można w żaden sposób zmierzyć, jak szybko układ ten się porusza.

**pęd**

Ważne pojęcie fizyczne. Pierwotną i najbardziej oczywistą postacią pędu jest pęd kinetyczny, związany z ruchem cząstek. W mechanice przedrelatywistycznej kinetyczny pęd ciała utożsamiano z iloczynem jego masy i prędkości. Newton nazwał pęd „ilością ruchu” i wielkość ta pojawia się w jego drugiej zasadzie dynamiki: tempo zmiany pędu ciała jest równe działającej na nie sile. W szczególnej teorii względności pęd jest ściśle związany z energią. Z uwagi na symetrię „pchnięcia” energia i pęd mieszają się ze sobą, tak samo jak przestrzeń i czas. Obowiązuje zasada zachowania całkowitego pędu izolowanego układu fizycznego.

We współczesnych teoriach fizycznych pęd występuje jako pojęcie podstawowe, na takim samym poziomie jak przestrzeń, z którą łączy go głęboki związek. Na przykład odległość *D*, jaką muszą przebyć przestrzenne, okresowe zaburzenia elektryczne wewnątrz fotonu, by wykonać jeden pełny cykl drgań, związana jest z pędem fotonu *P* równaniem *PD = h*, gdzie *h* jest stałą Plancka. W ramach tych teorii zasada zachowania pędu wynika z symetrii równań ze względu na przesunięcie w przestrzeni – czyli, innymi słowy, z faktu, że prawa są wszędzie takie same. [*Por. z hasłem*: energia].

**pole**

Byt wypełniający przestrzeń. Pojęcie pola pojawiło się w fizyce w XIX wieku za sprawą prac Faradaya i Maxwella poświęconych elektryczności i magnetyzmowi. Uczeni ci odkryli, że prawa elektryczności i magnetyzmu można sformułować dużo prościej, jeżeli przyjmie się, że całą przestrzeń wypełniają (niewidoczne) pola elektryczne i magnetyczne. Siła wywierana w danym miejscu na ładunek elektryczny jest miarą siły pola elektrycznego w tym

punkcie; jednak w ujęciu Faradaya–Maxwella pole istnieje bez względu na to, czy jest jakaś cząstka, która mogłaby odczuć jego wpływ. Pola żyją zatem własnym życiem. Pojęcie to wkrótce dowiodło swej użyteczności, gdy Maxwell odkrył, że samonapędzające się zaburzenia pól elektrycznych i magnetycznych można zinterpretować jako światło, bez konieczności odwoływania się do materialnych ładunków czy prądów.

W kwantowej wersji elektrodynamiki pola elektromagnetyczne tworzą i niszczą fotony. Ogólnie rzecz biorąc, wzbudzenia, które postrzegamy jako cząstki (elektrony, kwarki, gluony itp.), powstają i znikają za sprawą różnych pól (pól elektronowych itp.) i to właśnie one są obiektami podstawowymi. Dzięki temu potrafimy wytłumaczyć istotny fakt, że każde dwa elektrony, gdziekolwiek by się znajdowały we Wszechświecie, mają takie same podstawowe własności – a mianowicie są one wytworem tego samego pola!

Czasem fizycy lub inżynierowie mówią: „W naszym specjalnym ekranowanym laboratorium zredukowaliśmy pola elektryczne i magnetyczne do zera". Nie dajcie się oszukać! Oznacza to jedynie, że *średnia wartość* tych pól wynosi zero; mimo to pole elektromagnetyczne, jako byt, wciąż jest tam obecne. W szczególności pole magnetyczne w dalszym ciągu w ekranowanym laboratorium będzie reagowało na przepływ prądu i wciąż aż kipi w nim od fluktuacji kwantowych – to znaczy, od wirtualnych fotonów. Podobnie średnia wartość pól elektrycznych i magnetycznych w głębokim kosmosie jest zerowa lub bliska zera, jednak same pola się tam rozciągają i umożliwiają przesyłanie promieni światła na dowolnie duże odległości. (Pole niszczy foton w jednym miejscu i wytwarza nowy w kolejnym punkcie…). [*Zob. także*: pole kwantowe].

**pole kwantowe**

Wypełniający przestrzeń byt zachowujący się zgodnie z prawami teorii kwantowej. Pola kwantowe są prawowitymi potomkami mariażu mechaniki kwantowej ze szczególną teorią względności. Różnią się od klasycznych pól tym, że zawsze i w całej przestrzeni

dochodzi w nich do samoistnej aktywności, nazywanej również fluktuacjami kwantowymi lub wirtualnymi cząstkami. Teorię Rdzenia, podsumowującą nasze najlepsze rozumienie procesów fizycznych na poziomie fundamentalnym, formułuje się właśnie na podstawie pól kwantowych. Cząstki są zjawiskami wtórnymi – lokalnymi zaburzeniami w podstawowych bytach, czyli w polach kwantowych.

Z połączenia mechaniki kwantowej z klasyczną teorią pola wynikają pewne ogólne konsekwencje, nieistniejące w każdej z tych teorii oddzielnie – należą do nich: istnienie typów cząstek, które są takie same w całym Wszechświecie i niezmienne w czasie (na przykład wszystkie elektrony mają takie same własności); istnienie statystyk kwantowych [*zob.*: bozon, fermion]; istnienie antycząstek; nieuchronność powiązania cząstek z siłami (na przykład z istnienia sił elektrycznych i magnetycznych można wywnioskować istnienie fotonów); wszechobecność przekształceń cząstek (pola kwantowe tworzą i niszczą cząstki); konieczność istnienia prostoty i wysokiej symetrii w spójnych prawach oddziaływań i wreszcie swoboda asymptotyczna [*zob.*: swoboda asymptotyczna]. Wszystkie te konsekwencje kwantowej teorii pola są dobrze widocznymi przejawami badanej przez nas rzeczywistości.

**pole metryczne**

Pole określające w danym punkcie czasoprzestrzeni jednostki miary czasu i odległości (we wszystkich kierunkach). Dzięki takiemu polu przestrzeń zostaje wyposażona w linijki i zegary. Zwyczajne linijki i zegary przekładają te podstawowe struktury na zrozumiałą dla nas postać. Materia wpływa na pole metryczne i na odwrót. To wzajemne oddziaływanie, powodujące powstanie siły grawitacji, opisuje ogólna teoria względności. [*Zob. także*: ogólna teoria względności].

**prędkość**

Tempo zmiany położenia.

**proton**

Bardzo trwała kombinacja kwarków i gluonów. Kiedyś uważano, że protony i neutrony są cząstkami elementarnymi; teraz rozumiemy, że są obiektami złożonymi. Można skonstruować użyteczny model jądra atomowego, przyjmując, że jest ono układem związanych ze sobą protonów i neutronów. Cząstki te mają prawie takie same masy – neutrony są około 0,2% cięższe. Protony są obdarzone ładunkiem elektrycznym *e* o takiej samej wielkości jak ładunek elektronów, ale o przeciwnym znaku. Jądrami atomów wodoru są pojedyncze protony. Wiemy, że czas życia protonów wynosi przynajmniej $10^{32}$ lat (jest to okres znacznie dłuższy od wieku Wszechświata), jednak teorie unifikacji przewidują, że czas ten nie powinien być znacznie dłuży od tego ograniczenia – obecnie przeprowadzane są eksperymenty mające na celu zbadanie tego przewidywania.

**przyspieszenie**

Tempo zmiany prędkości. Przyspieszenie jest zatem tempem zmiany tempa zmiany położenia. Najważniejszym odkryciem mechaniki newtonowskiej był fakt, że przyspieszeniem często rządzą proste prawa.

**QCD**

Skrót od ang. *quantum chromodynamics* – chromodynamika kwantowa. [*Zob. także*: chromodynamika].

**QED**

Skrót od ang. *quantum electrodynamics* – elektrodynamika kwantowa. Jest to oczywiście elektrodynamika rozszerzona o teorię kwantową. W teorii tej w polach zachodzi samoistna aktywność (wirtualne fotony), a ich zaburzenia przyjmują postać dyskretnych, podobnych do cząstek jednostek (rzeczywistych fotonów). [*Zob. także*: elektrodynamika, foton, pole kwantowe].

**Rdzeń**

Nasza robocza teoria oddziaływania silnego, elektromagnetycznego, słabego i grawitacji. Opiera się na mechanice kwantowej, trzech rodzajach symetrii lokalnej – a mianowicie chodzi o grupy przekształceń *SU*(3), *SU*(2), *U*(1) – i ogólnej teorii względności. Teoria Rdzenia formułuje precyzyjne równania rządzące wszystkimi podstawowymi procesami, o których nam obecnie wiadomo. Jej przewidywania sprawdzono w wielu doświadczeniach i dowiedziono ich dokładności. Rdzeń nie jest jednak pozbawiony pewnych wad estetycznych, mamy więc nadzieję, że nie stanowi on ostatniego słowa Natury. (Tak naprawdę nie może nim być, ponieważ nie opisuje ciemnej materii).

**reguła jezuitów**

„Lepiej prosić o przebaczenie, niż pytać o pozwolenie". To głęboka prawda.

**Rejestr Ładunków**

Wyszukana nazwa zunifikowanego zestawienia kwarków i leptonów wyjaśniającego w pełni prawidłowości występujące wśród ładunków oddziaływania silnego (kolor), słabego i elektromagnetycznego. Związana z tym struktura matematyczna jest reprezentacją spinorową grupy *SO*(10) wraz ze szczególną podgrupą *SU*(3) × *SU*(2) × *U*(1). Wybór takiej podgrupy mówi o tym, jak w ramach teorii zunifikowanej sytuuje się teoria Rdzenia. Jeśli dopuścimy jedynie przekształcenia tej ustalonej, mniejszej symetrii Rdzenia, zunifikowany Rejestr Ładunków rozbije się na sześć rozłącznych elementów, a szczególny wzór ładunków elektrycznych (lub równoważnie hiperładunków) pozostanie niewyjaśniony. [*Zob. także*: teoria zunifikowana].

**RHIC**

Skrót od ang. *Relativistic Heavy Ion Collider* – Relatywistyczny Zderzacz Ciężkich Jonów. Akcelerator RHIC działa na Long Island w Brookhaven National Laboratory. Zderzenia w RHIC odtwarzają w bardzo małej objętości i na niezwykle krótkie chwile ekstremalne

warunki, które ostatni raz pojawiły się we Wszechświecie w najwcześniejszych momentach Wielkiego Wybuchu.

**równania Maxwella**

Układ równań opisujących zachowanie pól elektrycznych i magnetycznych, a także sposób ich reakcji na ładunki elektryczne i prądy. Maxwell wyprowadził pełny układ równań w roku 1864, zapisując symbolicznie znane wówczas wzajemne oddziaływania elektryczności, magnetyzmu, ładunku i prądu oraz postulując jednocześnie istnienie nowego efektu, dzięki któremu układ ten spełnia zasadę zachowania ładunku. Pierwotnie Maxwell sformułował te równania w sposób mało elegancki, dlatego leżąca u ich podstaw (głęboka) prostota i symetria nie była od razu widoczna. Później fizycy, w szczególności Heaviside, Hertz i Lorentz, wprowadzili nieco porządku i nadali równaniom Maxwella znaną dzisiaj postać. Równania w stanie nienaruszonym przetrwały rewolucję kwantową, chociaż zmieniła się interpretacja pól elektrycznych i magnetycznych. [*Zob. także*: pole].

**równania Yanga–Millsa**

Uogólnienie równań Maxwella obejmujące symetrie różnych rodzajów ładunków. Mówiąc w przybliżeniu i kolokwialnie, możemy stwierdzić, że równania Yanga–Millsa są bardziej rozrośniętą wersją równań Maxwella. Obecne teorie oddziaływania silnego i elektrosłabego w dużej mierze opierają się na równaniach Yanga–Millsa dla grup symetrii, odpowiednio, $SU(3)$ i $SU(2) \times U(1)$.

**równanie Diraca**

Wyprowadzone przez Paula Diraca w 1928 roku, jest ono efektem modyfikacji równania Schrödingera dla kwantowomechanicznej funkcji falowej elektronu; celem tej modyfikacji było uzgodnienie równania Schrödingera z symetrią „pchnięcia” (to znaczy, ze szczególną teorią względności). Mówiąc w przybliżeniu, równanie Diraca jest cztery razy większe od równania Schrödingera. Dokładniej jest ono zestawem czterech połączonych ze sobą równań,

opisujących cztery funkcje falowe. Cztery składniki równania Diraca automatycznie zawierają spin (skierowany w górę lub w dół) zarówno cząstek, jak i antycząstek, co tłumaczy, dlaczego istnieje czwórka równań. Z niewielkimi modyfikacjami równanie Diraca wykorzystuje się również do opisu kwarków i neutrin. W dzisiejszej fizyce interpretujemy równanie Diraca jako opis pola tworzącego i niszczącego elektrony (lub, co równoważne, niszczącego i tworzącego pozytony), a nie jako równanie falowe poszczególnych cząstek.

**równanie Schrödingera**

Przybliżone równanie funkcji falowej elektronu. Równanie Schrödingera nie zawiera symetrii „pchnięcia", czyli innymi słowy, nie jest zgodne ze szczególną teorią względności. Opisuje jednak dobrze elektrony o niezbyt dużych prędkościach i łatwiej się nim operuje niż dokładniejszym równaniem Diraca. Równanie Schrödingera jest podstawą wielu działań praktycznych w chemii kwantowej i fizyce ciała stałego.

**Siatka**

Byt, który postrzegamy jako pustą przestrzeń. Nasze najgłębiej sięgające teorie fizyczne pokazują, że ma ona złożoną strukturę; w rzeczy samej wydaje się, że jest ona podstawowym składnikiem rzeczywistości. Siatce poświęciłem w całości rozdział ósmy.

**siła**

1. W fizyce newtonowskiej siłę definiuje się jako wpływ, który działając na ciało, powoduje jego przyspieszenie. Definicja taka okazała się bardzo owocna i w dalszym ciągu jest użyteczna, ponieważ w wielu przypadkach mamy do czynienia z siłami prostymi. Na przykład na odizolowane ciało nie działają żadne siły – stwierdzenie to jest równoważne z pierwszą zasadą dynamiki Newtona, która mówi, że takie ciało porusza się ze stałą prędkością.
2. We współczesnej fizyce cząstek elementarnych – a szczególnie w teorii Rdzenia i jej zunifikowanych rozszerzeniach – stare pojęcie

siły nie jest już tak użyteczne. Wciąż często spotyka się wyrażenia takie jak „*siła* elektromagnetyczna”, „siła słaba” i tak dalej, ale we własnym gronie fizycy mówią zwykle bardziej abstrakcyjnie o „oddziaływaniach”.

**skrócenie Lorentza–Fitzgeralda**

Efekt polegający na tym, że stacjonarnemu obserwatorowi zdaje się, iż struktura poruszającego się ciała skraca się (kurczy) w kierunku ruchu. Fitzgerald i Lorentz zaproponowali, by za pomocą takiego efektu wyjaśnić niektóre obserwacje z dziedziny elektrodynamiki poruszających się ciał. Einstein wykazał, że skrócenie to jest logiczną konsekwencją symetrii „pchnięcia” w postaci sugerowanej przez równania Maxwella – innymi słowy, konsekwencją szczególnej teorii względności.

**SLAC**

Skrót od ang. *Stanford Linear Accelerator Complex* – Kompleks Akceleratora Liniowego Uniwersytetu Stanforda. Instytut naukowy, który odegrał kluczową rolę w powstaniu teorii Rdzenia. To tutaj Friedman, Kendall, Taylor i ich współpracownicy wykonali z wysoką rozdzielczością i krótkim czasem ekspozycji zdjęcia wnętrza protonu, dzięki którym otwarła się przed nami droga prowadząca do QCD. Akcelerator o ponad trzykilometrowej długości, którym się posługiwali, był w istocie ultrastroboskopowym nanomikroskopem.

**spin**

Spin cząstki elementarnej jest miarą jej momentu pędu. Moment pędu jest z kolei wielkością zachowywaną, która ma taki sam związek z obrotami w przestrzeni jak pęd z przesunięciami w przestrzeni. [*Zob. także:* pęd]. W mechanice klasycznej moment pędu ciała jest miarą jego ruchu obrotowego. Spin cząstki elementarnej jest albo liczbą całkowitą, albo liczbą całkowitą + ½ razy $h/2\pi$, gdzie $h$ jest stałą Plancka. Wielkość spinu jest stałą cechą każdego rodzaju cząstek. Mówi się, że leptony i kwarki mają spin ½, ponieważ jego wartość wynosi ½ razy $h/2\pi$. Protony i neutrony

również mają spin równy ½. Fotony, gluony oraz wuony i zetony mają spin 1. Piony i hipotetyczna cząstka Higgsa mają spin 0. Polaryzacja światła jest fizycznym przejawem spinu fotonów.

Moment pędu izolowanego ciała jest zachowywany. Aby zmienić moment pędu, musimy przyłożyć do ciała moment siły. Szybko wirujące żyroskopy mają olbrzymi moment pędu i fakt ten w dużej mierze tłumaczy ich niezwykłe reakcje na siły.

**spontaniczne łamanie symetrii**

Mówimy, że do spontanicznego złamania symetrii dochodzi wtedy, gdy stabilne rozwiązania zbioru równań mają mniejszą symetrię niż same równania. W szczególności może do tego dojść, gdy bardziej opłacalne energetycznie jest utworzenie kondensatu lub pola tła, o czym była mowa w rozdziale ósmym i dodatku B. Owo stabilne rozwiązanie spowoduje wypełnienie przestrzeni substancją, której własności zmieniają się pod wpływem przekształceń (dawnej) symetrii. Przekształcenia takie przestają już być jedynie rozróżnieniem formalnym – teraz wprowadzają zauważalne zmiany! Związana z nimi symetria uległa spontanicznemu złamaniu.

**stała Plancka**

Stała fizyczna odgrywająca kluczową rolę w teorii kwantowej. Występuje na przykład w związku $E = hv$ między energią fotonu a częstotliwością $v$ światła, które tworzy, czy też w równaniu $p = h/\lambda$ wiążącym pęd fotonu z długością jego fali świetlnej $\lambda$.

**supersymetria (SUSY)**

Nowy rodzaj symetrii. Umożliwia przekształcenia między cząstkami mającymi takie same ładunki, ale różne spiny. W szczególności pozwala nam uważać bozony i fermiony, mimo całkowicie odmiennych własności fizycznych, za różne oblicza jednego bytu. Supersymetrię można osiągnąć przez zastosowanie symetrii „pchnięcia” w superprzestrzeni, czyli w rozszerzeniu czasoprzestrzeni o dodatkowe wymiary kwantowe.

Nasze obecne równania Rdzenia nie przejawiają supersymetrii, możliwe jest jednak ich rozszerzenie o supersymetrię. Takie nowe równania przewidują istnienie wielu nowych cząstek, z których żadnej jak dotąd nie zaobserwowano. Aby cząstki te były ciężkie, musimy założyć istnienie jakiejś postaci nadprzewodnictwa Siatki. Dobre w tym wszystkim jest to, że nowe cząstki, w swojej postaci wirtualnej, pozwalają na przedstawienie udanej, ilościowej unifikacji sił, co opisaliśmy w rozdziale dwudziestym. Jedna z tych nowych cząstek mogłaby być dobrą kandydatką na składnik ciemnej materii. Akcelerator LHC powinien mieć moc wystarczającą do wyprodukowania niektórych z nich, jeżeli istnieją.

**swoboda asymptotyczna**

Pojęcie zakładające, że oddziaływanie silne słabnie na mniejszych odległościach. Mówiąc konkretnie, efektywne ładunki koloru, decydujące o sile oddziaływania silnego, stają się mniejsze na krótszych odległościach. Można też powiedzieć odwrotnie, że siła oddziaływania danego, wyizolowanego ładunku koloru rośnie wraz z odległością. Fizyczne wyjaśnienie tego zjawiska opiera się na tym, że ładunek źródłowy powoduje powstanie obłoku cząstek wirtualnych, które go wzmacniają lub, innymi słowy, *antyekranują*. Konsekwencją istnienia swobody asymptotycznej jest to, że często dochodzi do wypromieniowania szybko poruszającego się ładunku koloru zmierzającego w tym samym co cząstka macierzysta kierunku (tak zwane promieniowanie „miękkie”), natomiast promieniowanie zmieniające ogólny kierunek poruszania się cząstek jest rzadkie. Promieniowanie miękkie dostarcza kwarkom towarzyszy, z którymi mogą się połączyć i utworzyć hadrony; jednak globalny kierunek przepływu cząstek odbywa się zgodnie z trendem wyznaczonym przez kwarki (i antykwarki oraz gluony), które go zapoczątkowały. Z tego powodu możemy „obserwować” kwarki i gluony nie jako pojedyncze cząstki, ale jedynie w postaci dżetów, które wyzwalają. [*Zob. także*: ładunek bez ładunku, dżety].

**symetria**

Z symetrią mamy do czynienia wówczas, gdy rozróżnienia mają charakter jedynie formalny. Innymi słowy, obiekt – lub zbiór równań – ma symetrię wtedy, gdy istnieją pewne operacje, które *mogłyby* go zmienić, ale po ich przeprowadzeniu żadna zmiana jednak nie zachodzi. Trójkąt równoboczny jest zatem symetryczny ze względu na obrót wokół swojego środka o 120°, natomiast dowolny inny trójkąt takiej symetrii już nie przejawia.

**symetria cechowania**

[*Zob.*: symetria lokalna].

**symetria lokalna (symetria cechowania)**

Symetria pozwalająca na dokonywanie niezależnych przekształceń w różnych obszarach czasoprzestrzeni. Symetria lokalna stawia bardzo duże wymagania, którym może sprostać niewiele równań. Przeciwnie, zakładając istnienie symetrii lokalnej, dochodzimy do bardzo szczególnych równań, typu równań Maxwella lub Yanga–Millsa. Właśnie te równania charakteryzują teorię Rdzenia i świat. Symetria lokalna zwana jest również symetrią cechowania z uwagi na pewne interesujące, lecz zagmatwane, rozważane w przeszłości zagadnienia. [*Zob. także*: równania Maxwella, równania Yanga–Millsa, symetria].

**teoria elektrosłaba**

Współczesna teoria opisująca oddziaływania słabe i elektromagnetyczne. Czasami bywa nazywana również Modelem Standardowym. W teorii elektrosłabej najważniejsze są dwie idee. Pierwszą jest fakt, że w równaniach teorii obowiązuje lokalna symetria, co prowadzi do równań Maxwella i Yanga–Millsa. Drugą – pogląd, że przestrzeń jest niezwykłym typem nadprzewodnika, który – mówiąc potocznie – powoduje zwarcie niektórych oddziaływań i dlatego nie obserwujemy ich wpływu. (Innym ważnym pojęciem jest to, że oddziaływania są chiralne. Są to już dosyć szczegółowe zagadnienia, nie będę ich więc opisywał w tym miejscu. Najbardziej spektakularną konsekwencją tego faktu jest to, że oddziaływania

słabe łamią parzystość – to znaczy, symetrię między stroną lewą i prawą). Czasem mówi się, że teoria elektrosłaba unifikuje QED i oddziaływania słabe, ale jeśli mamy być dokładni, powinniśmy raczej mówić, że ona jedynie miesza ze sobą te oddziaływania. [*Zob. także*: oddziaływanie słabe].

**teoria superstrun**

Zbiór idei rozszerzających prawa fizyki. Była inspiracją wspaniałych prac wybitnych ludzi, których efekty mają ważne zastosowania w matematyce teoretycznej. Obecnie teoria superstrun nie przedstawia równań opisujących konkretne zjawiska w świecie przyrody. W szczególności nie udało się wykazać, że teoria Rdzenia, która tak dokładnie opisuje wiele zjawisk świata fizycznego, wyłania się z teorii superstrun jako jej przybliżenie.

Idee teorii superstrun nie zawsze są sprzeczne z teorią Rdzenia czy z ideami unifikacji przedstawionymi w tej książce. Jednak omawiane tu idee nie powstały z teorii superstrun ani nie zostały z niej wyprowadzone. Jak obszernie wyjaśniałem, wynikają one częściowo z doświadczenia, a częściowo z matematyki/estetyki.

**teoria zunifikowana**

Różne składniki teorii Rdzenia opierają się na wspólnych zasadach – mechanice kwantowej, teorii względności i symetrii lokalnej – mimo to w ramach tej teorii zachowują swoją odrębność i odmienność. Mamy oddzielne przekształcenia symetryczne dla ładunków koloru teorii QCD, ładunków koloru oddziaływania słabego teorii elektrosłabej oraz hiperładunku. W ramach tych przekształceń kwarki i leptony dzielą się na sześć niezwiązanych ze sobą klas (a tak naprawdę osiemnaście, jeśli uwzględnimy potrojenie wynikające z istnienia zapachu). Cała ta struktura aż się prosi o większą, obejmującą wszystko symetrię. Po zbadaniu różnych możliwości matematycznych okazuje się, że wiele rzeczy zaczyna do siebie ściśle pasować. Względnie niewielkie rozszerzenie równań pozwala nam widzieć wszystkie znane symetrie jako fragmenty jednej satysfakcjonującej całości i tym samym połączyć ze sobą

rozproszone leptony. Dodatkowo, w ramach premii, w zasięgu takiego scalenia pojawia się też grawitacja, która wcześniej wydawała się beznadziejnie słaba, wyraźnie różna pod tym względem od pozostałych sił podstawowych. Wygląda na to, że aby z tych idei mogły wyniknąć satysfakcjonujące szczegółowe dane liczbowe, musimy również włączyć supersymetrię. Na podstawie analizy rozszerzonych w ten sposób równań przewiduje się istnienie wielu nowych cząstek i zjawisk. Jak wyjaśniliśmy w rozdziałach 19–21, w tej kwestii nic nie jest jeszcze przesądzone, ale już niedługo powinny zapaść pierwsze rozstrzygnięcia.

**uwięzienie**

Stwierdzenie faktu, że nigdy nie udało się zaobserwować pojedynczych kwarków. Mówiąc dokładniej, dla każdego obserwowalnego stanu liczba kwarków minus liczba antykwarków jest wielokrotnością 3. (Pamiętajmy, że 0 jest również wielokrotnością 3). Uwięzienie jest matematyczną konsekwencją chromodynamiki, ale dowód tego wcale nie jest prosty.

**węzeł**

[*Zob.*: wierzchołek].

**wierzchołek**

Punkt w czasoprzestrzeni, w którym oddziałują cząstki (rzeczywiste lub wirtualne). Na diagramach Feynmana wierzchołki to miejsca, w których spotykają się co najmniej trzy linie. Teorie oddziaływań cząstek określają, jakiego rodzaju wierzchołki są możliwe i jakie są związane z nimi czynniki matematyczne. [*Zob. także*: diagram Feynmana].

**zapach**

W dzisiejszej fizyce – niezbyt dobrze rozumiana trójwartościowa cecha kwarków i leptonów, istniejąca niezależnie od ich ładunków. Istnieją na przykład trzy różne zapachy kwarków *U*: *u* (górny), *c* (powabny) oraz *t* (wysoki). Każdy z nich ma taki sam ładunek

elektryczny 2*e*/3 i jedną jednostkę ładunku koloru (czerwonego, białego lub niebieskiego). Poza tym istnieją trzy zapachy kwarków *D*: *d* (dolny), *s* (dziwny) oraz *b* (niski), również występujące w trzech kolorach z ładunkiem elektrycznym −*e*/3. Podobnie mamy trzy zapachy leptonów: *e* (elektron), *μ* (mion) i *τ* (taon) – te cząstki mają ładunek elektryczny −*e*, ale nie posiadają ładunku koloru, i w końcu są jeszcze trzy rodzaje neutrin, pozbawione ładunku koloru i ładunku elektrycznego. W ramach każdej z tych grup cząstki o różnych zapachach w identyczny sposób reagują na wpływ oddziaływań Rdzenia. Różnią się między sobą masą, czasami znacznie (na przykład kwark *t* jest przynajmniej 35 tysięcy razy cięższy od *u*). Oddziaływania słabe pozwalają na wzajemne przekształcanie się różnych zapachów. Nie mamy żadnej dobrej teorii wyjaśniającej, dlaczego ich masy są takie a nie inne.

Chociaż wuony reagują na zmianę zapachu, myliłby się ten, kto by sądził, że w oddziaływaniach słabych zapach odgrywa taką samą rolę jak kolor w oddziaływaniu silnym. Wuony nie reagują bezpośrednio na własność nazywaną przez nas zapachem, ale jedynie na kolejną parę ładunków, które nazywamy ładunkami koloru oddziaływania słabego. Wuony zmieniają zapachy, że tak powiem, jedynie dla sportu; nie to nimi kieruje. Tajemnicą pozostaje, dlaczego dochodzi do potrojenia cząstek o identycznym układzie ładunków i jakie są reguły gry w zmianę zapachu, w którą bawią się wuony.

**zasada zachowania**

Mówimy, że dana wielkość fizyczna jest zachowana, jeżeli jej wartość w izolowanym układzie nie zmienia się z upływem czasu. Ładunek, energia i pęd to ważne przykłady wielkości, dla których obowiązuje zasada zachowania. Zasady zachowania są niezwykle ważne, ponieważ stanowią stały punkt odniesienia wśród nieustającej zmienności kwantowej Siatki.

**zwykła materia**

Substancja fizyczna, której badaniem zajmuje się biologia, chemia, materiałoznawstwo i inżynieria oraz w dużej mierze astrofizyka. Jest to oczywiście substancja, z której zbudowani są ludzie, ich zwierzęta domowe i maszyny. Zwykła materia składa się z kwarków *u* oraz *d*, elektronów, gluonów i fotonów. Dysponujemy dokładną, ścisłą i nadzwyczaj pełną teorią zwykłej materii: jest nią samo jądro Rdzenia.

# Uwagi

## Rozdział 1

Krótkim i bardzo przystępnym, choć teraz już częściowo przestarzałym, wprowadzeniem do fizyki jest książka *Charakter praw fizycznych*, napisana przez wielkiego fizyka Richarda Feynmana. Inne dzieło, *Feynmana wykłady z fizyki* (w trzech tomach), zostało napisane przez Richarda Feynmana, Roberta Leightona i Matthew Sandsa z myślą o studentach Caltech, ale początkowe części każdego tomu i wiele poszczególnych rozdziałów napisano bez zagłębiania się w szczegóły rachunkowe, normalnym, a bardzo często wręcz zachwycającym językiem i stylem.

## Rozdział 3

Książka *The Principle of Relativity* jest nieodzownym wręcz zbiorem klasycznych artykułów poświęconych teorii względności. Zawiera artykuły napisane przez Lorentza, Einsteina, Minkowskiego i Weyla. Można w niej znaleźć obydwa oryginalne artykuły Einsteina na temat szczególnej teorii względności, a także artykuł, który zainicjował ogólną teorię względności. W pierwszej połowie pierwszego artykułu Einsteina poświęconego szczególnej teorii względności prawie wcale nie ma równań i czytanie tego tekstu jest czystą przyjemnością. Początkowe fragmenty jego pierwszej prezentacji ogólnej teorii względności również napisano przystępnie i są one niezwykle inspirujące. (Uwaga dla studentów fizyki: moim zdaniem artykuł ten,

czytany w całości, wciąż jest jednym z najlepszych wprowadzeń do ogólnej teorii względności). *Ewolucja fizyki* Alberta Einsteina i Leopolda Infelda to czarująca pozycja popularnonaukowa poświęcona nie tylko samej teorii względności, lecz także elektromagnetyzmowi stanowiącemu jej intelektualne tło i podstawom fizyki pól. Dwa dobre współczesne wprowadzenia do teorii względności to książki: *Fizyka czasoprzestrzeni* Edwina Taylora i Johna Wheelera oraz *Czas na czas: klucz do teorii Einsteina* Davida Mermina.

## Rozdział 5

Książka Richarda Rhodesa *Jak powstała bomba atomowa* jest nie tylko arcydziełem historii i literatury, lecz także doskonałym wprowadzeniem do fizyki jądrowej.

## Rozdział 8

Ukazało się wiele biografii Einsteina. Dwie są wyjątkowe, podkreślają bowiem jego wkład w naukę, są to napisane przez samego Einsteina *Zapiski autobiograficzne* oraz książka Abrahama Paisa *Pan Bóg jest wyrafinowany*… Pais sam był wybitnym fizykiem.

Z kolei Feynman nie napisał żadnej systematycznej autobiografii, ale jego osobowość emanuje z napisanych przez niego zbiorów anegdot *Pan raczy żartować, panie Feynman!* oraz *A co ciebie obchodzi, co myślą inni?*. Książka zatytułowana *Geniusz* Jamesa Gleicka to świetnie napisane i dobrze udokumentowane świadectwo barwnego życia Feynmana.

# Rozdział 11

Publikacja *The Physics of Musical Instruments* Davida Lappa, dostępna w internecie pod adresem http://www.tufts.edu/as/wright_center/workshops/workshop_archives/physics_2003_wkshp/book/pom_book_acrobat_7.pdf, jest inteligentnym, krótkim, nieprzeładowanym matematyką i bogato ilustrowanym wprowadzeniem do fizyki dźwięków i instrumentów muzycznych. Dwa arcydzieła poświęcone tej tematyce to książki *On the Sensations of Tone* Hermanna Helmholtza oraz *The Theory of Sound* (2 tomy) lorda Rayleigh. Zapewnie jedynie zawodowi fizycy przeczytają te książki od deski do deski, a poza tym niektóre fragmenty pracy Helmholtza już się zestarzały, ale warto choćby pobieżnie je przejrzeć. Dzięki takim dziełom można być dumnym z tego, że jest się człowiekiem.

# Rozdział 17

Jako pierwsi na pomysł doprowadzenia do unifikacji Rdzenia przez rozszerzenie jego lokalnej symetrii wpadli Jogesh Pati i Abdus Salam oraz Howard Georgi i Sheldon Glashow. Georgi jako pierwszy zaproponował zastosowanie symetrii $SO(10)$ i klasyfikacji silnie akcentowanej w tym rozdziale. Zagadnienia te świetnie opisano w książkach *Grand Unified Theories* Grahama Rossa i *Unification and Supersymmetry* Rabindry Mohapatry.

# Rozdział 18

Howard Georgi, Helen Quinn i Steven Weinberg jako pierwsi przeprowadzili obliczenia pokazujące, jak owe trzy oddziaływania

zachowują się na małych odległościach. Chcieli w ten sposób sprawdzić, czy w takich warunkach może dojść do unifikacji. (W przypadku oddziaływania silnego były to oczywiście obliczenia, które wcześniej przeprowadziłem z Davidem Grossem; niezależnie od nas wykonał je także David Politzer).

## Rozdział 20

Wspólnie z Savasem Dimopoulosem i Stuartem Rabym jako pierwsi rozważaliśmy kwestię wpływu supersymetrii na ewolucję sprzężeń. Moje osobiste wspomnienia z tego okresu znajdziecie w dodatku C.

## Rozdział 21

Aby uzyskać więcej informacji na temat projektów realizowanych w LHC i poznać najnowsze doniesienia, możecie odwiedzić stronę internetową CERN pod adresem: http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html. Ukazał się również zbiór artykułów na ten temat napisanych przez czołowych ekspertów: *Perspectives on LHC Physics* pod redakcją Gordona Kane'a. Polecam również własny artykuł naukowy: *Anticipating a New Golden Age*, który znajdziecie pod adresem frankwilczek.com.

## Dodatek C

Dodatek C opiera się na moim artykule o takim samym tytule, który po raz pierwszy ukazał się w czasopiśmie „Nature" 2004, nr 428, s. 261, a który został tu wykorzystany za zgodą właścicieli praw do jego publikacji.

# Ilustracje

## Rysunki

Rysunek 7.3 opiera się na ilustracji, która po raz pierwszy ukazała się w moim artykule *QCD Made Simple* w czasopiśmie „Physics Today" 2000, nr 53 (8), s. 22–28, i został wykorzystany w niniejszej książce za zgodą właścicieli praw autorskich.

Rysunek 8.1 opiera się na ilustracji, którą zamieszczono w dokumentacji aplikacji ArcInfo Workstation firmy ESRI i został wykorzystany w niniejszej książce za zgodą właścicieli praw autorskich.

Rysunki 9.1, 9.2 oraz 9.3 opierają się na uaktualnionej wersji pracy opublikowanej przez grupę MILC w czasopiśmie „Physical Review" 2004, nr 70 (094505), seria D (rysunek 17), która została wykorzystana w niniejszej książce za zgodą właścicieli praw autorskich.

## Kolorowa wkładka

Ryciny 1, 2, 8 oraz 9 zaczerpnąłem z archiwum CERN i wykorzystałem w niniejszej książce za zgodą właścicieli praw autorskich.

Rycina 3a wykorzystuje obraz *Biblioteka matematyka* Aldo Spizzichina, którego użyto w niniejszej książce za zgodą właścicieli praw autorskich.

Rycina 3b opiera się na pracy Michaela Rossmana i jego zespołu, opublikowanej w czasopiśmie „Nature" 1985, nr 317, s. 145–153, która została wykorzystana w niniejszej książce za jego zgodą.

Autorem ilustracji przedstawionej na rycinie 4 jest Derek Leinweber z Centrum Badawczego Subatomowej Struktury Materii (CSSM) na Uniwersytecie w Adelajdzie – ilustracja ta została wykorzystana za jego zgodą.

Rycina 5 opiera się na pracy grupy STAR i jej reprodukcję zamieszczono za zgodą Brookhaven National Laboratory.

Rycina 6 jest dziełem Grega Kilcupa i jego zespołu – zamieszczam ją za jego zgodą.

Rycina 7 przedstawia reprodukcję obrazu *Syrena* Johna Williama Waterhouse'a (*circa* 1900).

Autorem ilustracji na rycinie 10 jest Richard Mushotzky – zamieszczam ją tutaj za jego zgodą.

# Literatura uzupełniająca

## Książki w języku polskim


Frank Close, *Kosmiczna cebula: kwarki i Wszechświat*, przeł. Wanda Stępień-Rudzka, PWN, Warszawa 1988.

Albert Einstein, *Ewolucja fizyki: rozwój poglądów od najdawniejszych pojęć do teorii względności i kwantów*, przeł. Ryszard Gajewski, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998.

Albert Einstein, *Zapiski autobiograficzne*, przeł. Jacek Bieroń, Znak, Kraków 1996.

Richard Feynman, *„A co ciebie obchodzi, co myślą inni?": dalsze przypadki ciekawego człowieka*, przeł. Rafał Śmietana, Znak, Kraków 2008.

Richard Feynman, *Charakter praw fizycznych*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.

Richard Feynman, *Feynmana wykłady z fizyki*, przeł. Piotr Amsterdamski, PWN, Warszawa 2007.

Richard Feynman, *„Pan raczy żartować, panie Feynman!" : przypadki ciekawego człowieka*, przeł. Tomasz Bieroń, Znak, Kraków 2007.

Richard Feynman, *QED: osobliwa teoria światła i materii*, przeł. Helena Białkowska, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.

Murray Gell-Mann, *Kwark i jaguar: przygody z prostotą i złożonością*, przeł. Piotr Amsterdamski, CiS, Warszawa 1996.

James Gleick, *Geniusz: życie i nauka Richarda Feynmana*, przeł. Piotr Amsterdamski, Zysk i S-ka, Poznań 1992.

Brian Greene, *Piękno Wszechświata*, przeł. Ewa L. Łokas i Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.

Alan Guth, *Wszechświat inflacyjny: w poszukiwaniu nowej teorii pochodzenia kosmosu*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.

Piet Hein, *Gruki: wybór*, przeł. Bogusława Sochańska, Świadectwo, Bydgoszcz 1999.

Tomasz Hofmokl, Michał Święcki, *Cząstki elementarne*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1982.

Gordon Kane, *Supersymetria. Supersymetryczne cząstki i odkrywanie podstawowych praw przyrody*, przeł. Tomasz Krzysztoń, Agnieszka Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.

Leon Lederman, Dick Teresi, *Boska Cząstka. Jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?*, przeł. Elżbieta Kołodziej-Józefowicz, Prószyński i S-ka, Warszawa 1996, 2007.

Don Lincoln, *Kwantowa granica. LHC – Wielki Zderzacz Hadronów*, przeł. Bogumił Bieniok, Ewa L. Łokas, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010.

N. David Mermin, *Czas na czas: klucz do teorii Einsteina*, przeł. Jerzy Przystawa, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008.

Abraham Pais, *Pan Bóg jest wyrafinowany ...: nauka i życie Alberta Einsteina*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.

Richard Rhodes, *Jak powstała bomba atomowa*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.

Edwin F. Taylor, John A. Wheeler, *Fizyka czasoprzestrzeni*, przeł. Barbara Pierzchalska, PWN, Warszawa 1975.

Frank Wilczek, Betsy Devine, *W poszukiwaniu harmonii: wariacje na tematy z fizyki współczesnej*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2007.

Steven Weinberg, *Pierwsze trzy minuty: współczesne poglądy na początki Wszechświata*, przeł. Aleksander Blum, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998.

Steven Weinberg, *Teoria pól kwantowych*, 3 tomy, przeł. Danuta Rzążewska, Lech Szymanowski, Piotr Chankowski, PWN, Warszawa 1999 (t. 1, 2) 2001 (t. 3).

Hermann Weyl, *Symetria*, przeł. Stefan Kulczycki, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997.

Richard Wiseman, *Dziwnologia: odkrywanie wielkich prawd w małych rzeczach*, przeł. Jacek Konieczny, W.A.B., Warszawa 2010.

# Książki w języku angielskim

J. Bahcall (red.), W. Haxton (red.), K. Kubodera (red.), C. Poole (red.), *Neutrino Physics*, World Scientific Publishing Company, 2001.

Benjamin Bederson (red.), *More Things in Heaven and Earth*, Springer, New York 1999.

Frank Close, *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*, Taylor & Francis, New York 2006.

Eugene Commins, Philip Bucksbaum, *Weak Interactions of Leptons and Quarks*, Cambridge University Press, Cambridge 1983.

Robert Griffiths, *Consistent Quantum Theory*, Cambridge University Press, Cambridge 2008.

Jane Harrison, *Prolegomena to the Study of Greek Religion*, Cambridge University Press, Cambridge 2010.

Hermann Helmholtz, *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*, Dover, New York 1954.

Max Jammer, *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy*, Princeton University Press, Princeton 2009.

Gordon Kane (red.), Aaron Pierce (red.), *Perspectives on LHC Physics*, World Scientific Publishing Company, Hackensack, NJ 2008.

Lawrence Krauss, *Hiding in the Mirror: The Quest for Alternate Realities, from Plato to String Theory*, Penguin, New York 2006.

Lawrence Krauss, *Quintessence: The Mystery of the Missing Mass in the Universe*, Basic Books, New York 2001.

Robert Kirshner, *The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos*, Princeton University Press, Princeton 2002.

Ming Li, Paul Vitányi, *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*, Springer, New York 2008.

H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, H. Weyl, *The Principle of Relativity*, przeł. W. Perret, G.B. Jeffery, Dover, 2008.

Ernst Mach, *The Science of Mechanics*, przeł. Thomas J. MacCormack, Open Court, 1988.

David MacKay, *Information Theory, Inference & Learning Algorithms*, Cambridge University Press, 2002.

Charles W. Misner, Kip S. Thorne, John A. Wheeler, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco 1973.

Rabindra N. Mohapatra, *Unification and Supersymmetry*, Springer, 2002.

Izaak Newton, *Newton's Philosophy of Nature*, Free Press, 1970.

Robert Oerter, *The Theory of Almost Everything: the Standard Model, the Unsung Triumph of Modern Physics*, Pi Press, New York 2006.

Michael Peskin, Daniel Schroeder, *An Introduction To Quantum Field Theory*, Westview Press, Boulder 1995.

Lisa Randall, *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*, Harper Perennial, New York 2006.

J.W.S. Rayleigh, *The Theory of Sound*, New York, Dover, 1976.

Michael Riordan, *The Hunting of the Quark: a True Story of Modern Physics*, Simon & Schuster, New York 1987.

Graham Ross, *Grand Unified Theories*, Westview Press, Boulder 2003.

Paul Schilpp (red.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, MJF Books, 2001.

Paul Schilpp (red.), *Philosophy of Karl Popper*, Open Court, La Salle, IL 1977.

Mark Srednicki, *Quantum Field Theory*, Cambridge University Press, 2007.

Dirk Struik, *Lectures on Classical Differential Geometry*, Dover, New York 1988.

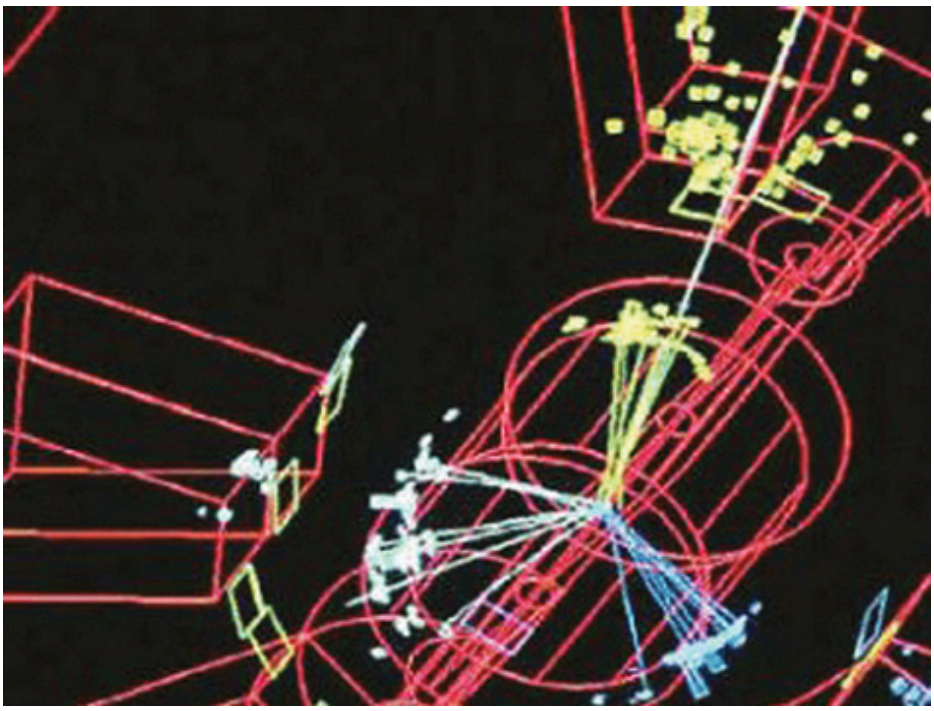
Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*, Little, Brown and Company, New York 2006.

Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, John Wiley & Sons, New York 1972.

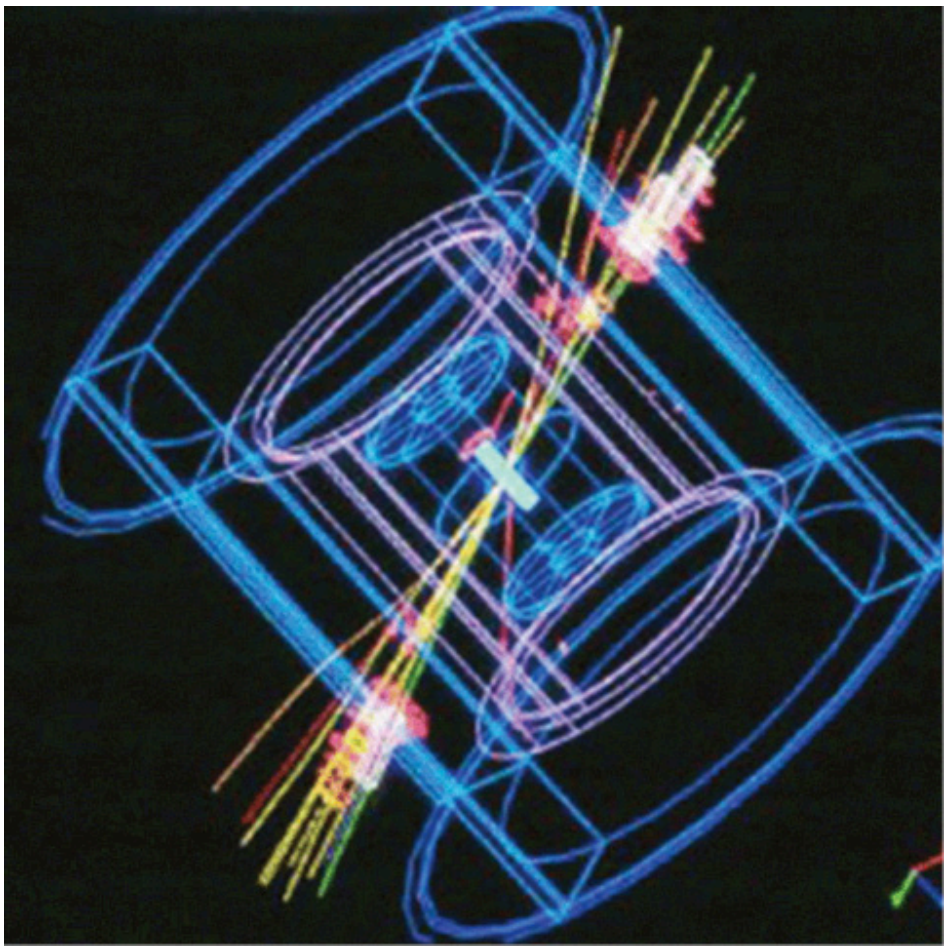
Eugene Wigner, *Symmetries and Reflections*, Ox Bow Press, Woodbridge, CT 1979.

Anthony Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press, Princeton 2010.

# Zdjęcia

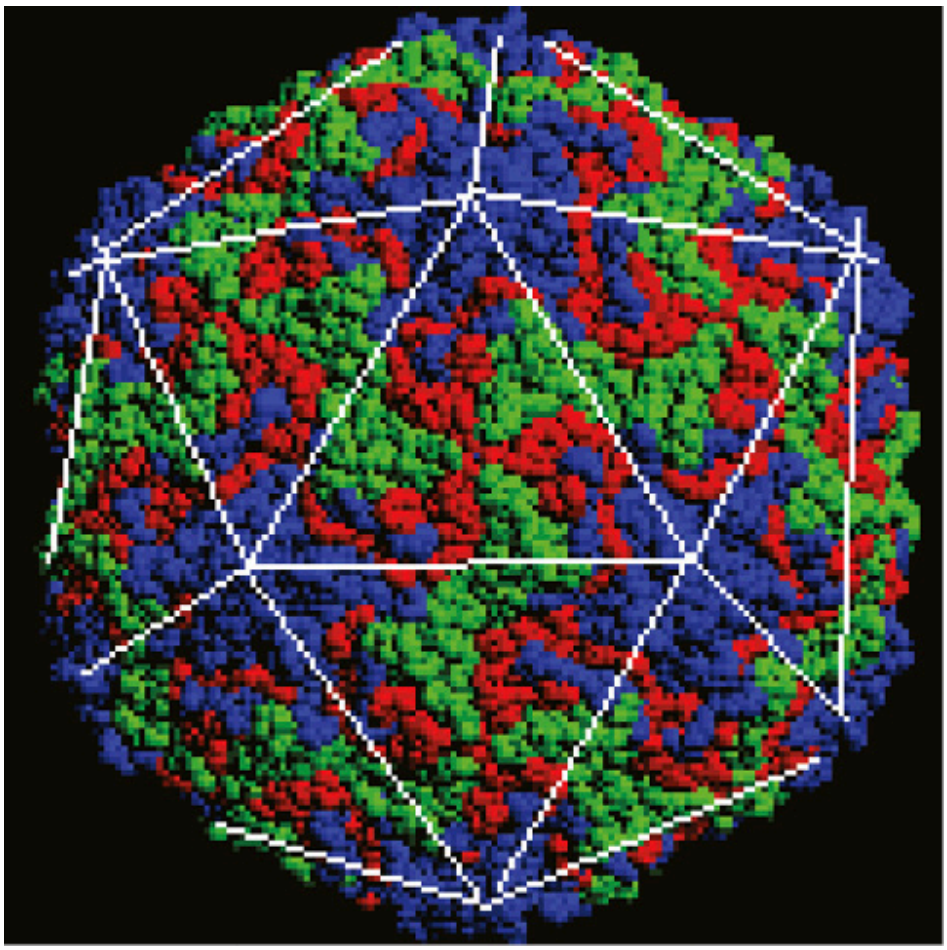


Rycina 1. Fotografia wykonana w Wielkim Zderzaczu Elektronowo-Pozytonowym, w skrócie LEP (od ang. *Large Electron-Positron collider*), który w latach dziewięćdziesiątych działał w CERN w pobliżu Genewy. Przepływ dżetów rozbiegających się z punktu zderzenia jest zgodny z przewidzianymi teoretycznie wzorami dla kwarka, antykwarka i gluonu. Dżety mają praktyczne znaczenie w przypadku tych obiektów, których nie można zaobserwować bezpośrednio tak jak innych cząstek.

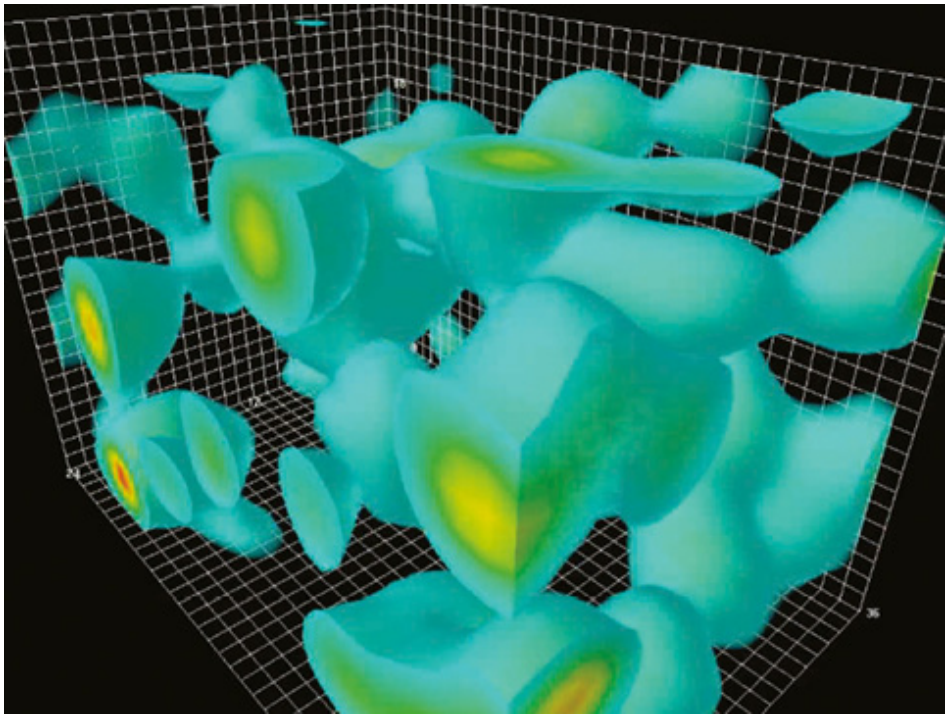


Rycina 2. Proces, w którym powstają dwa dżety. Interpretujemy je jako ślady po pojawieniu się kwarka i antykwarka.

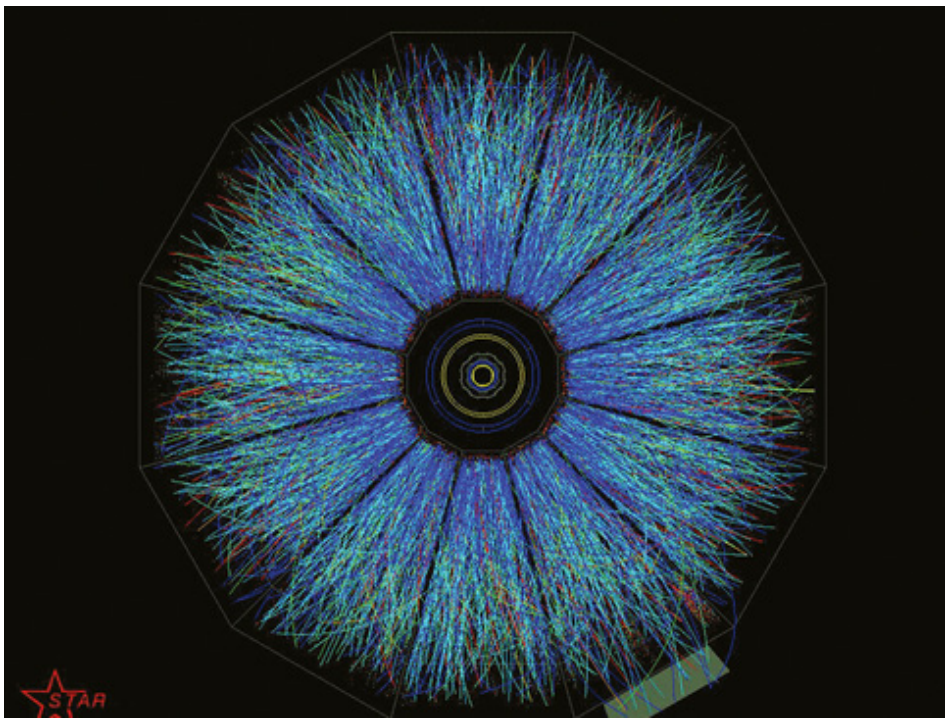
Rycina 3 a. Symetria w nauce, sztuce i rzeczywistości na przykładzie dwudziestościanu foremnego. Dwudziestościan foremny ma dwadzieścia identycznych ścian – wszystkie są trójkątami równobocznymi. Taka bryła ma 59 różnych symetrii; innymi słowy, istnieje 59 różnych obrotów przekształcających dwudziestościan foremny z powrotem w siebie (zamieniających przy tym miejscami niektóre z jego ścian). Porównajmy to z dwoma różnymi symetriami trójkąta równobocznego. Można powiedzieć, że symetria QCD ma się tak do symetrii QED jak symetria dwudziestościanu foremnego do symetrii pojedynczego trójkąta.



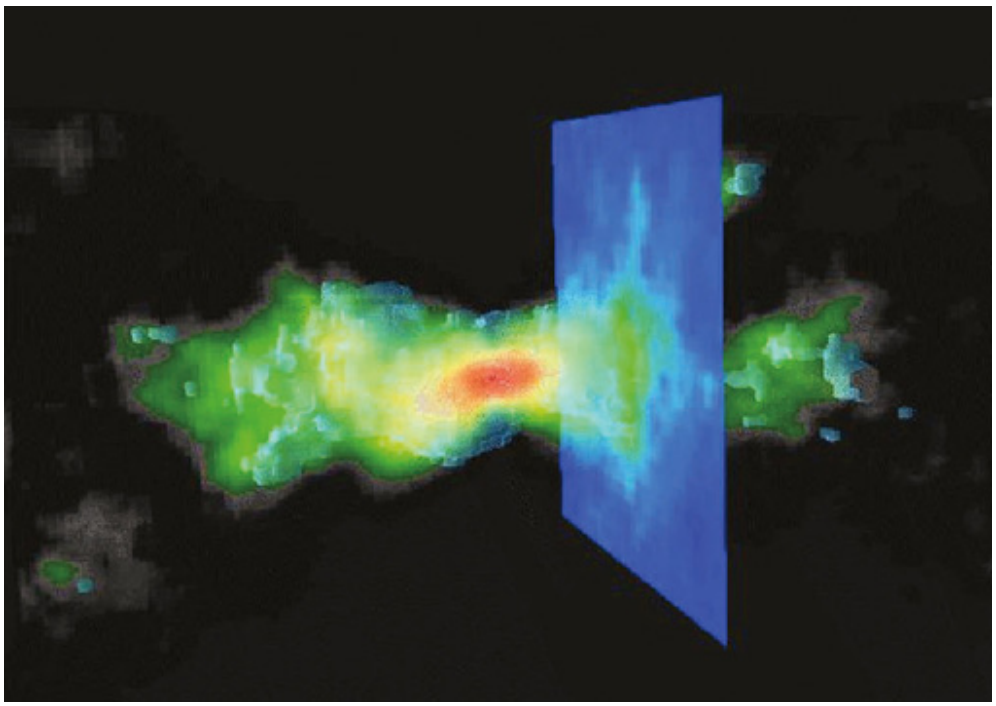
Rycina 3 b. Symetria w nauce, sztuce i rzeczywistości na przykładzie dwudziestościanu foremnego. b) Potężna symetria pozwala na określenie skomplikowanych struktur za pomocą prostych składników – z tej własności korzysta DNA (lub RNA) wirusa. Na ilustracji pokazano strukturę wirusa zwyczajnej grypy. Zwróćmy uwagę na podobieństwo do ilustracji z ryciny a!.



Rycina 4. Głęboka struktura kwantowej Siatki. Jest to typowy wzorzec aktywności w polach gluonowych QCD. Takie wzorce są kluczowe dla pomyślnego wyznaczenia mas hadronów, jak wyjaśniamy w rozdziale dziewiątym, a zatem możemy zakładać, że odpowiadają one rzeczywistości. Dane do tej pięknej grafiki wyliczył Derek Leinweber z Uniwersytetu w Adelajdzie.

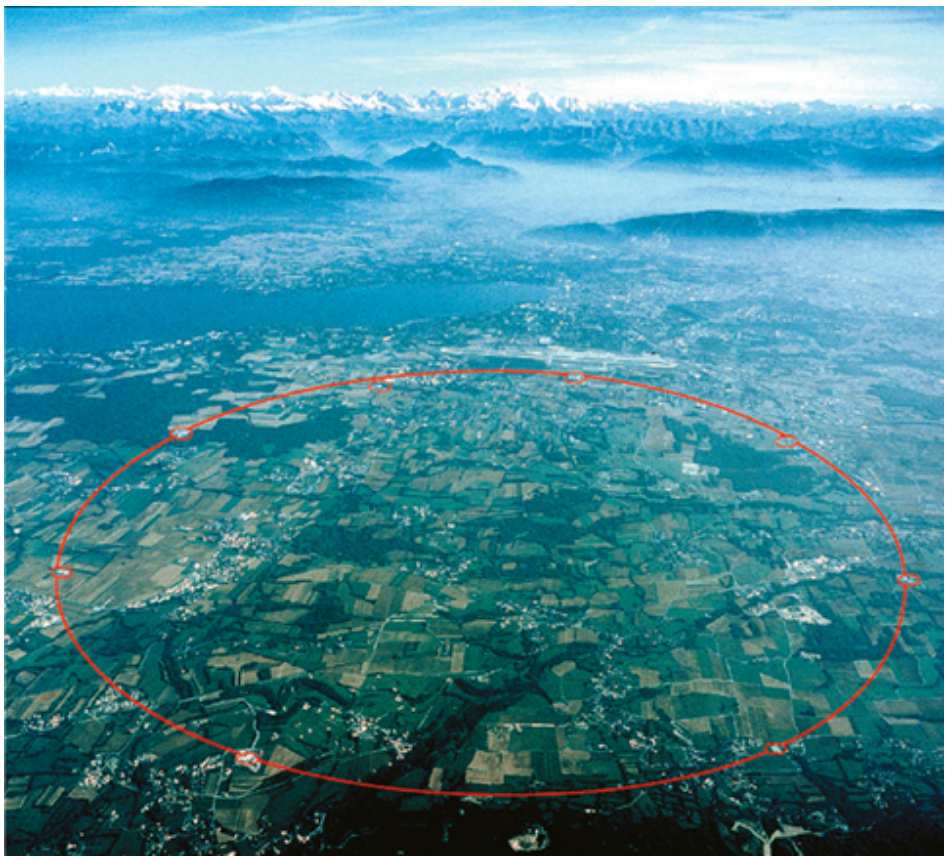



Rycina 5. Wynik zderzenia ciężkich jonów – miniaturowa wersja Wielkiego Wybuchu.

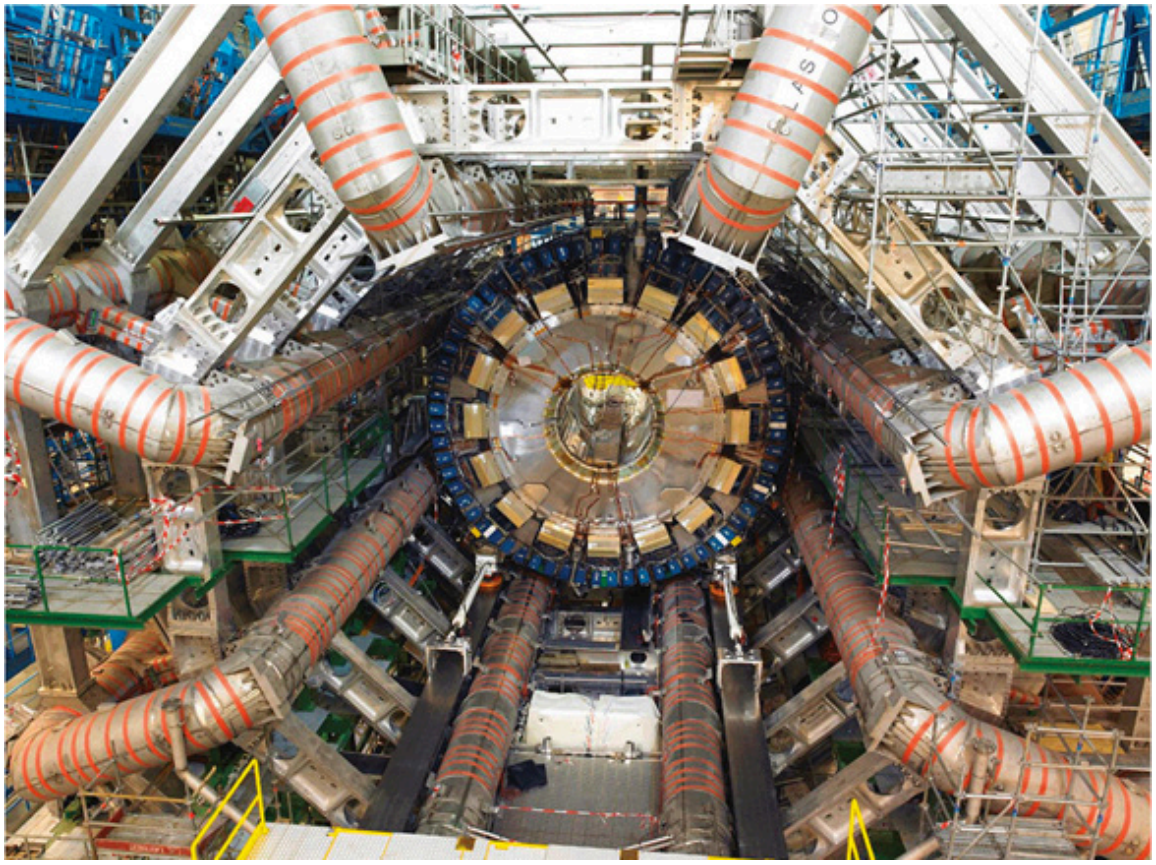


Rycina 6. Zaburzenie Siatki. Z lewej strony umieszczono kwark i antykwark. Cząstki te szybko osiągają stan równowagi dynamicznej, dzięki czemu energia przemieszczającego się w czasie zaburzenia obejmuje jedynie niewielką objętość przestrzeni. Fluktuacje Siatki zostały uśrednione, dlatego widoczny jest jedynie wypadkowy rozkład nadmiarowej energii. Na przekroju możemy zaobserwować rozkład energii wewnątrz konkretnej cząstki, w tym przypadku pionu. Całkowita energia stanowi masę pionu, zgodnie z drugim prawem Einsteina.

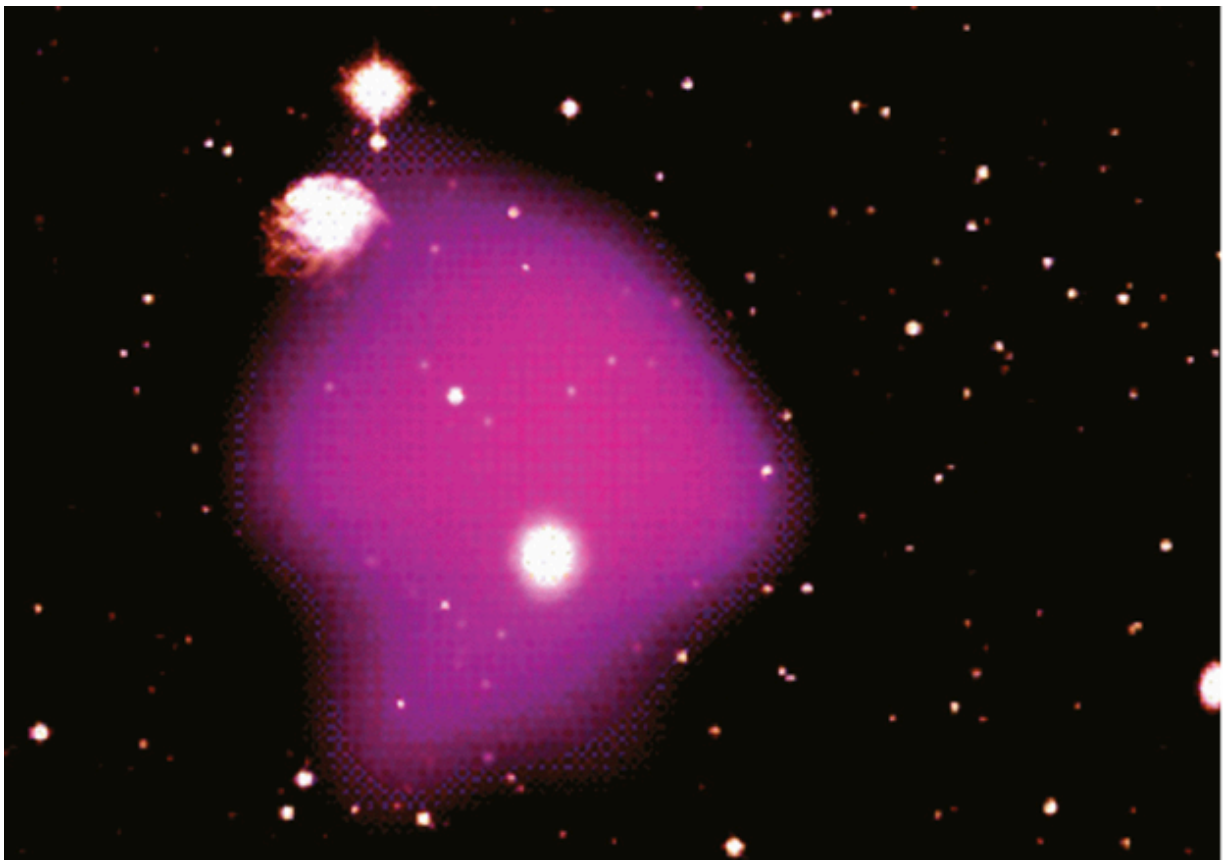
Rycina 7. Urzekająca pieśń syreny nawołuje nas, byśmy porzucili wygodną pewność i podążyli za nią na jeżący się wątpliwościami brzeg. W zamian obiecuje nam piękno i olśnienie. Czy ona nas uczy, czy tylko się droczy?.



Rycina 8. Widok LHC z lotu ptaka. Łańcuch Jury i Jezioro Genewskie tworzą tajemniczą scenerię. Na zdjęciu dokonano pewnych modyfikacji: w rzeczywistości cała maszyneria znajduje się pod ziemią..



Rycina 9. Detektor ATLAS akceleratora LHC na wczesnym etapie montażu. W ostatecznej, działającej postaci detektora to gigantyczne rusztowanie jest szczelnie wypełnione magnesami, czujnikami i niezwykle szybkimi urządzeniami elektronicznymi. Wszystko to jest potrzebne do wybudowania aparatu fotograficznego pozwalającego robić zdjęcia obszarom o rozmiarach rzędu $10^{-17}$ centymetra z czasem ekspozycji rzędu $10^{-27}$ sekundy!



Rycina 10. Widzialna ciemność. Ciemna materia nie emituje światła, można ją „zobaczyć” jedynie poprzez wpływ grawitacyjny, jaki wywiera na zwykłą materię. Stosując techniki przetwarzania obrazu, możemy sprawić, by nasze oczy ujrzały świat taki, jakim widzą go grawitony. Na tym zdjęciu, wykonanym przez satelitę ROSAT, widać uwięziony gorący gaz zaznaczony nierzeczywistym, różowym kolorem. Stanowi on wyraźny dowód na to, że w obszarze tym działa grawitacja o sile przekraczającej wpływ grawitacyjny znajdujących się w środku galaktyk. Tę dodatkową grawitację przypisuje się ciemnej materii. Z pewnych pomysłów na udoskonalenie równań fizycznych wynika, że powinny istnieć nowe formy materii, których własności doskonale nadają się na ciemną materię. Wkrótce być może dowiemy się, które, jeżeli w ogóle któreś, z tych pomysłów są zgodne z rzeczywistością..

Rycina 11. Autor ze znaną blogerką Betsy Devine wewnątrz elementu drugiego głównego detektora LHC, którego skrócona nazwa brzmi CMS – od ang. *Compact(!) Muon Solenoid*, czyli Zwarty(!) Solenoidowy Detektor Mionów.

# Spis treści


O tytule
Wskazówki dla czytelników
Część I. Pochodzenie masy
- Rozdział 1. Istota rzeczy
  - Zmysły a modele świata
  - Moc, sens i metoda
  - Znaczenie masy
- Rozdział 2. Zerowe prawo Newtona
  - Bóg a zerowe prawo Newtona
  - Powrót do rzeczywistości
  - Spadanie
  - Czy masa miała swój początek?
- Rozdział 3. Drugie prawo Einsteina
  - Odkrywanie nowych praw – metoda uproszczona
  - Drugie prawo Einsteina
  - FAQ – najczęściej zadawane pytania
- Rozdział 4. Co liczy się w materii
  - Elementy składowe
- Rozdział 5. Ukryta hydra
  - Smoki Fermiego
  - Walka ze smokami
  - Hydra
- Rozdział 6. Bity bytu
  - Kwarki: wersja beta
  - Kwarki 1.0: obserwacje przez nanomikroskop ultrastroboskopowy
  - Partony
  - Zbyt proste
  - Swoboda asymptotyczna (ładunek bez ładunku)
  - Kwarki i gluony 2.0: uwierzyć znaczy zobaczyć
- Rozdział 7. Ucieleśnienie symetrii
  - Równania, łączniki i patyczki

- Kwarki i gluony 3.0: ucieleśnienie symetrii
- Rozdział 8. Siatka (trwałość eteru)
  - Krótka historia eteru
  - Szczególna teoria względności a Siatka
  - Gluony a Siatka
  - Siatka materialna
  - Pole metryczne, kolebka wszystkich Siatek
  - Siatka ma swoją wagę
  - Podsumowanie
- Rozdział 9. Liczenie materii
  - Składanie modeli w trzydziestu dwóch wymiarach
  - Demon Laplace’a kontra chaos Siatki
  - Wielkie obliczanie
- Rozdział 10. Pochodzenie masy
  - Idea pierwsza: niezwykłe burze
  - Idea druga: kosztowne zrównoważenie
  - Idea trzecia: drugie prawo Einsteina
  - Scholium
- Rozdział 11. Muzyka Siatki: poemat w dwóch równaniach
- Rozdział 12. Głęboka prostota
  - Doskonałość w złożoności: Salieri, Józef II i Mozart
  - Głęboka prostota: Sherlock Holmes, jeszcze raz Newton i młody Maxwell
  - Kompresja, dekompresja i (nie)wykrywalność

Część II. Słabość grawitacji
- Rozdział 13. Czy grawitacja jest słaba? W praktyce: tak
- Rozdział 14. Czy grawitacja jest słaba? W teorii: nie
  - Powszechność a unifikacja
- Rozdział 15. Właściwe pytanie
- Rozdział 16. Piękna odpowiedź
  - Wizja Pitagorasa, jednostki Plancka
  - Weryfikacja unifikacji
  - Dalsze kroki

Część III. Czy piękno jest prawdą?
- Rozdział 17. Unifikacja: śpiew syreny
  - Rdzeń: do wyboru, do koloru

Analiza krytyczna
Rejestr Ładunków
Śpiew syreny
Rozdział 18. Unifikacja: niewyraźny obraz po drugiej stronie szyby
To nie symetria
Patrzymy uważniej
Niewiele brakowało
Rozdział 19. Prawdyfikacja
Podnosimy stawkę: jeszcze więcej unifikacji
Rozdział 20. Unifikacja SUSY
Poprawki do poprawek
I grawitacja też
Rozdział 21. U progu nowego złotego wieku
Projekt LHC
Równowaga za sprawą ciemnej materii
Pierwsza jaskółka już jest – czekamy na kolejne
Epilog. Gładki kamyk, ładna muszla
Wyznanie
Jeszcze raz ciemność
Słowo końcowe
Podziękowania
Dodatki
Dodatek A. Cząstki mają masę, świat ma energię
Dodatek B. Wielowarstwowy, różnokolorowy kosmiczny nadprzewodnik
Kosmiczne nadprzewodnictwo: warstwa elektrosłaba
Kosmiczne nadprzewodnictwo: warstwa silnosłaba
Dodatek C. Od „pozbawionych błędów” modeli do (niemal) poprawnej idei
Słownik
Uwagi
Rozdział 1
Rozdział 3
Rozdział 5
Rozdział 8

- Rozdział 11
- Rozdział 17
- Rozdział 18
- Rozdział 20
- Rozdział 21
- Dodatek C
- Ilustracje

Literatura uzupełniająca
- Książki w języku polskim
- Książki w języku angielskim

Zdjęcia